



Ricardo Albuquerque Melo

Licenciado em Engenharia Mecânica

**Análise da influência das variáveis do processo
de furação de materiais compósitos sobre o
dano através do método de Taguchi com
características dinâmicas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Carla Maria Moreira Machado, Prof. Auxiliar,
FCT, UNL
Co-orientador: Jorge Joaquim Pamies Teixeira, Prof.
Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos
Arguentes: Prof. Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos
Vogais: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2014

Análise da influência das variáveis do processo de furacão de materiais compósitos sobre o dano através do método dinâmico de Taguchi.

Copyright © 2014 Ricardo Albuquerque Melo, Faculdade de Ciências e Tecnologia e

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A todos os que contribuíram directa e indirectamente para a realização desta dissertação queria deixar um agradecimento especial.

Ao Instituto de Emprego e Formação Profissional de Setúbal pelo material disponibilizado para este estudo e pelo apoio demonstrado.

À Professora Carla Machado pela sua orientação, preocupação, disponibilidade e paciência ao longo de todo este período, pois só com o seu apoio foi possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Jorge Pamies Teixeira, pela transmissão de conhecimentos e co-orientação.

Ao Sr. António Campos e Paulo Magalhães pela disponibilidade e pela ajuda a nível técnico que foi necessária para a realização do trabalho.

Aos professores que durante todo o percurso pela FCT demonstraram preocupação e disponibilidade que de certa forma ajudou na minha formação.

Aos meus pais e irmã que sem o seu apoio e amor incondicional teria sido impossível ultrapassar esta etapa e superar todos os desafios, a todo o esforço e ajuda recebida para que fosse possível realizar este sonho.

Resumo

Hoje em dia a utilização de materiais compósitos por parte das indústrias é cada vez maior porque conseguem satisfazer as exigências actuais de maneira mais eficiente do que os materiais convencionais. Com o fabrico de compósitos pretende-se atingir valores óptimos de parâmetros como a forma, massa, força, durabilidade, rigidez, custos, etc. O processo de furação em materiais compósitos é um processo bastante complexo porque a furação provoca danos no material que podem comprometer as suas ligações. O dano mais importante na furação de materiais compósitos é a delaminação, por esta razão, investigações conduzidas no sentido de a reduzir ou eliminar são essenciais.

A espessura dos componentes e o diâmetro dos furos são requisitos dos produtos a fabricar, mas a maioria dos modelos presentes na literatura não contempla a sua variação. Mantendo estes dois factores constantes é possível observar o efeito dos parâmetros de corte e definir os respectivos modelos empíricos, mas ainda não foi concretizado um modelo global que seja fiável do ponto de vista dos aspectos físicos do processo.

Neste trabalho estudou-se a influência das variáveis do processo de furação a alta velocidade em compósitos reforçados com fibra de carbono no dano resultante através do método de Taguchi com características dinâmicas, considerando como factores de sinal a espessura do provete e o diâmetro da ferramenta e como factores de controlo as restantes variáveis, velocidade de corte e velocidade de avanço. O propósito da sua utilização foi a análise individual do efeito de cada factor de sinal, para evitar que o seu predomínio no factor de delaminação possa camuflar a influência dos parâmetros de corte.

Em relação ao método utilizado, verificou-se não ser possível desacoplar os efeitos dos factores de sinal. Consequentemente, verificou-se que a influência dos parâmetros de corte fica imperceptível face ao efeito da espessura da peça e do diâmetro pretendido, não permitindo encontrar um modelo empírico generalizado. O facto do modelo de Taguchi com características dinâmicas não ser adequado pode ainda indiciar que não é possível generalizar os mecanismos do processo com base nestas variáveis.

Palavras-chave: Materiais Compósitos; Fibra de Carbono; Furação de Alta Velocidade; Delaminação; Método de Taguchi

Abstract

Nowadays the use of composite materials by industries is increasing as they can meet the higher requirements more efficiently than conventional materials. The drilling process of composite materials is very complex and it causes several damages on the material that may compromise their joints. The most important when drilling composites is delamination and research conducted in order to reduce or eliminate this damage is essential.

The thickness of the components and the holes diameter are project requirements fundamental to manufacture products, but most models from the literature do not include its variation. Keeping these two factors constant is possible to observe the effect of cutting parameters and define their empirical models, but a global model that is reliable from the point of view of the physical aspects of the process has not been achieved yet.

This work focus on studying the influence of the process variables on damage when high speed drilling carbon fibre reinforced composites using Taguchi method with dynamic parameters. The thickness of the specimen and the diameter of the tool are the signal factors considered and the remaining variables the control factors. The purpose of using this method is to analyse the individual effect of each signal factor, to prevent that its dominance may mask the influence of cutting parameters on the response signal delamination factor.

Regarding the method, it was found that is not possible to decouple the effects of the signal factors. Consequently, the influence of cutting parameters is not noticeable when compared to the specimen thickness or tool diameter effects and is not possible to find a general empirical model. The fact of the Taguchi model with dynamic characteristics is still inadequate may indicate that it is not possible to generalize the mechanisms of the process based on these variables.

Keywords: Composite Materials; Carbon Fibre; High Speed Drilling; Delamination; Taguchi Method

Índice de Matérias

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJECTIVO.....	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE	3
2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	5
2.2 FURAÇÃO EM MATERIAIS COMPÓSITOS	8
2.3 DANOS DECORRENTES DA FURAÇÃO	12
3 METODOLOGIA	17
3.1 MÉTODOS DE TAGUCHI	17
3.2 MÉTODO DE TAGUCHI COM CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS	20
3.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA.....	28
3.4 RESPOSTA EM SUPERFÍCIE	29
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
4.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	31
4.2 VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	34
4.3 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGEM.....	34
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
5.1 FACTOR DE SINAL – ESPESSURA 4MM	47
5.2 FACTOR DE SINAL – ESPESSURA 6MM	54
5.3 FACTOR DE SINAL – DIÂMETRO DA BROCA 5MM	61
5.4 FACTOR DE SINAL – BROCA DE DIÂMETRO 7MM	68
5.5 FACTOR DE SINAL – BROCA DE DIÂMETRO 9MM	75
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	97

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Delaminação: a) à entrada; b) à saída	13
Figura 2.2 – Caracterização do dano segundo Chen	14
Figura 2.3 – Caracterização do dano segundo Davim.....	15
Figura 3.1– Sensibilidade.....	21
Figura 3.2 – Linearidade	22
Figura 3.3 – Variabilidade.....	22
Figura 4.1 - Centro de maquinagem vertical LEADWELL VMC-15.....	31
Figura 4.2 - Cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153	31
Figura 4.3 - Sistema de fixação.....	32
Figura 4.4 - Dinamómetro <i>Kistler 9257B</i>	32
Figura 4.5 - Visualização das respostas (<i>LabVIEW</i>)	32
Figura 4.6 - Provetes	33
Figura 4.7 - Estufa.....	33
Figura 4.8 - Brocas helicoidais utilizadas	33
Figura 4.9 - Equipamento de radiografia digital: a) Kodak 2100; b) Kodak RVG 5100	35
Figura 4.10 – Procedimento do processamento de imagem.....	36
Figura 5.1 – Comparação da tendência dos valores do factor de delaminação entre as diferentes espessuras da ferramenta.....	38
Figura 5.2 – Comparação da tendência dos valores do factor de delaminação entre os diferentes diâmetros da ferramenta.....	38
Figura 5.3 – Factor de delaminação para cada ensaio com provete de 2 mm	39
Figura 5.4 – Força Axial para cada ensaio com provete de 2 mm	40
Figura 5.5 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 7); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 1).....	41
Figura 5.6 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 5\text{ mm}$ e $t = 2\text{ mm}$; b) força axial para $d = 5\text{ mm}$ e $t = 2\text{ mm}$	42

Figura 5.7 - Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 7$ mm e $t = 2$ mm; b) força axial para $d = 7$ mm e $t = 2$ mm	43
Figura 5.8 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 9$ mm e $t = 2$ mm; b) força axial para $d = 9$ mm e $t = 2$ mm	44
Figura 5.9 – Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura 2 mm)	46
Figura 5.10 – Gráfico de resíduos para força axial (espessura 2 mm)	46
Figura 5.11 – Factor de delaminação para cada ensaio com provete de 4 mm	47
Figura 5.12 – Força Axial para cada ensaio com provete de 4 mm	48
Figura 5.13 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 5); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 6).....	49
Figura 5.14 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 5$ mm e $t = 4$ mm; b) força axial para $d = 5$ mm e $t = 4$ mm	50
Figura 5.15 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 7$ mm e $t = 4$ mm; b) força axial para $d = 7$ mm e $t = 4$ mm	51
Figura 5.16 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 9$ mm e $t = 4$ mm; b) força axial para $d = 9$ mm e $t = 4$ mm	52
Figura 5.17- Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura 4 mm).....	53
Figura 5.18 - Gráfico de resíduos para a força axial (espessura 4 mm).	54
Figura 5.19 – Factor de delaminação para cada ensaio com provete de 6 mm	55
Figura 5.20 – Força Axial para cada ensaio com provete de 6 mm	55
Figura 5.21 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 5); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 6).....	56
Figura 5.22 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 5$ mm e $t = 6$ mm; b) força axial para $d = 5$ mm e $t = 6$ mm	57
Figura 5.23 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 7$ mm e $t = 6$ mm; b) força axial para $d = 7$ mm e $t = 6$ mm	58
Figura 5.24 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 9$ mm e $t = 6$ mm; b) força axial para $d = 9$ mm e $t = 6$ mm	59
Figura 5.25 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura 6 mm).....	60
Figura 5.26 - Gráfico de resíduos para a força axial (espessura 6 mm).	61

Figura 5.27 – Factor de delaminação para cada ensaio com broca de 5 mm	62
Figura 5.28 – Força Axial para cada ensaio com broca de 6 mm	62
Figura 5.29 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 9); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 5).....	63
Figura 5.30 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 2$ mm e $d = 5$ mm; b) força axial para $t = 2$ mm e $d = 5$ mm	64
Figura 5.31 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 4$ mm e $d = 5$ mm; b) força axial para $t = 4$ mm e $d = 5$ mm	65
Figura 5.32 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 6$ mm e $d = 5$ mm; b) força axial para $t = 6$ mm e $d = 5$ mm	66
Figura 5.33- Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (Broca de 5 mm).....	67
Figura 5.34 - Gráfico de resíduos para a força axial (Broca de 5 mm).	68
Figura 5.35 – Factor de delaminação para cada ensaio com broca de 7 mm	69
Figura 5.36 – Força axial para cada ensaio com broca de 7 mm.....	69
Figura 5.37 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 1); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 5).....	70
Figura 5.38 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 2$ mm e $d = 7$ mm; b) força axial para $t = 2$ mm e $d = 7$ mm	71
Figura 5.39 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 4$ mm e $d = 7$ mm; b) força axial para $t = 4$ mm e $d = 7$ mm	72
Figura 5.40 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 6$ mm e $d = 7$ mm; b) força axial para $t = 6$ mm e $d = 7$ mm	73
Figura 5.41 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (Broca de 7 mm).....	74
Figura 5.42 - Gráfico de resíduos para a força axial (Broca de 7 mm).	75
Figura 5.43 – Factor de delaminação para cada ensaio com broca de 9 mm	76
Figura 5.44 – Força axial para cada ensaio com broca de 9 mm.....	76
Figura 5.45 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 4); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 7).....	77
Figura 5.46 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 2$ mm e $d = 9$ mm; b) força axial para $t = 2$ mm e $d = 9$ mm	78

Figura 5.47 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 4$ mm e $d = 9$ mm; b) força axial para $t = 4$ mm e $d = 9$ mm	79
Figura 5.48 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 6$ mm e $d = 9$ mm; b) força axial para $t = 6$ mm e $d = 9$ mm	80
Figura 5.49 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (Broca de 9 mm).....	81
Figura 5.50 - Gráfico de resíduos para a força axial (Broca de 9 mm).	82
Figura 5.51 – Comparação entre os valores do factor de delaminação dos diferentes diâmetros da ferramenta.....	83
Figura 5.52 – Comparação entre os valores da força axial dos diferentes diâmetros da ferramenta	83
Figura 5.53 - Comparação entre os valores do factor de delaminação das diferentes espessuras de provete.....	84
Figura 5.54 - Comparação entre os valores da força axial das diferentes espessuras de provete.....	84
Figura 5.55 – Relação do S/N para os diferentes níveis dos factores de controlo para o factor de sinal espessura do provete.	85
Figura 5.56 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura)	86
Figura 5.57 - Gráfico de resíduos para a força axial (espessura)	86
Figura 5.58 – Relação do S/N para os diferentes níveis dos factores de controlo para o factor de sinal diâmetro da broca.....	87
Figura 5.59 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (diâmetro)	88
Figura 5.60 - Gráfico de resíduos para a força axial (diâmetro).....	88

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Propriedades típicas de alguns termoplásticos	6
Tabela 2.2 – Propriedades de resinas termoendurecíveis.....	6
Tabela 2.3 – Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça	7
Tabela 3.1 - Matriz Ortogonal L9 com factores de ruído.....	18
Tabela 4.1– Variáveis do processo e correspondentes níveis.	34
Tabela 5.1-Matriz L9	37
Tabela 5.2 – Planeamento de experiências para espessura de 2 mm.....	39
Tabela 5.3- Ensaios com menor e maior valor de delaminação e força axial para provete de 2 mm	40
Tabela 5.4 – Equações das regressões para provete de 2 mm do factor de delaminação e força axial.	45
Tabela 5.5 - Planeamento de experiências para espessura de 4 mm	47
Tabela 5.6- Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para provete de 4 mm	48
Tabela 5.7 – Equações das regressões para provete de 4 mm do factor de delaminação e força axial.	53
Tabela 5.8 - Planeamento de experiências para espessura de 6 mm	54
Tabela 5.9 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para provete de 6 mm	56
Tabela 5.10 – Equações das regressões para provete de 6 mm do factor de delaminação e força axial	60
Tabela 5.11 - Planeamento de experiências para broca de 5 mm.....	61
Tabela 5.12 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para broca de 5 mm.	63
Tabela 5.13– Equações das regressões para broca de 5 mm do factor de delaminação e força axial.	67
Tabela 5.14 - Planeamento de experiências para broca de 7 mm.....	68
Tabela 5.15 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para broca de 7 mm.	70

Tabela 5.16 – Equações das regressões para broca de 7 mm do factor de delaminação e força axial.	74
Tabela 5.17- Planeamento de experiências para broca de 9 mm.....	75
Tabela 5.18 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para broca de 7 mm.	77
Tabela 5.19– Equações das regressões para broca de 9 mm do factor de delaminação e força axial.	81
Tabela 5.20 – Resultados S/N para o factor de sinal espessura do provete.....	85
Tabela 5.21- Modelos empíricos obtidos para o factor de sinal espessura.....	85
Tabela 5.22 – Resultados S/N para o factor de sinal diâmetro da broca.	87
Tabela 5.23 – Modelos empíricos obtidos para o factor de sinal diâmetro	87
Tabela 6.1 – Conjunto de valores que minimizam o factor de delaminação	89
Tabela 0.1 – Ensaio 1º réplica (variável – d; espessura 2mm).....	97
Tabela 0.2 – Ensaio 1º réplica (variável – d; espessura 4mm).....	97
Tabela 0.3 – Ensaio 1º réplica (variável – d; espessura 6mm).....	98
Tabela 0.4 – Ensaio 1º réplica (variável – t; diâmetro 5mm).....	98
Tabela 0.5 – Ensaio 1º réplica (variável – t; diâmetro 7mm).....	98
Tabela 0.6 – Ensaio 1º réplica (variável – t; diâmetro 9mm).....	99
Tabela 0.7 – Ensaio 2º réplica (variável – d; espessura 2mm).....	99
Tabela 0.8 – Ensaio 2º réplica (variável – d; espessura 4mm).....	99
Tabela 0.9 – Ensaio 2º réplica (variável – d; espessura 6mm).....	100
Tabela 0.10 – Ensaio 2º réplica (variável – t; diâmetro 5mm).....	100
Tabela 0.11 – Ensaio 2º réplica (variável – t; diâmetro 7mm).....	100
Tabela 0.12 – Ensaio 2º réplica (variável – t; diâmetro 9mm).....	101
Tabela 0.13 – Ensaio 3º réplica (variável – d; espessura 2mm).....	101
Tabela 0.14 – Ensaio 3º réplica (variável – d; espessura 4mm).....	101
Tabela 0.15 – Ensaio 3º réplica (variável – d; espessura 6mm).....	102
Tabela 0.16 – Ensaio 3º réplica (variável – t; diâmetro 5mm).....	102
Tabela 0.17 – Ensaio 3º réplica (variável – t; diâmetro 7mm).....	102

Tabela 0.18 – Ensaios 3° réplica (variável – t; diâmetro 9mm)	103
---	-----

Nomenclatura

Símbolos

f	Avanço (mm/rev)
β'_0	Coefficiente do polinómio
β	Declive da recta da resposta
d	Diâmetro da Broca (mm)
D_{Max}	Diâmetro máximo (mm)
D_0	Diâmetro nominal do furo (mm)
ε	Erro
t	Espessura do provete (mm)
F_{crit}	Força crítica (N)
F_D	Factor de delaminação
F_{da}	Factor de delaminação ajustado
y_{ij}	j-ésima observação da experiência
\bar{y}_s	Média dos dados para o ponto de referência
\bar{Y}^2	Média amostral da experiência
$n\beta'$	Número de coeficientes do polinómio
$g.l._x$	Número de graus de liberdade
n	Número de observações por experiência
ρ_x	Percentagem de contribuição de um factor
D_{RAT}	Rácio de Dano
S / N	Razão Sinal-Ruído
y	Resposta
e_{ij}	Ruído branco
F_0	Significância de um factor
M	Sinal de entrada
S_T	Soma dos quadrados total
S_e	Variação associada ao erro

SS_x	Varição do factor X
S_β	Varição provocada pelo efeito linear
S^2	Variância amostral da experiência
x_i	Variáveis de controlo
V	Velocidade de corte (m/min)
V_e	Variância do erro
MS_{erro}	Variância Residual

Siglas

ANOVA	Análise de Variância
ANOM	Analysis of Means
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
PA	Poliamidas
PC	Policarbonatos
PP	Polipropilenos
PPS	Polisulfureto de fenileno
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
TIFF	Tagged Image File Format

1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade de evolução as indústrias, como é o caso da indústria aeroespacial, aeronáutica, automóvel, entre outras, tem exigido materiais mais resistentes e leves [1]. Como os materiais mais conhecidos não conseguem satisfazer as exigências, foi necessário o desenvolvimento de materiais, o que conduziu aos materiais compósitos.

Chama-se materiais compósitos a uma combinação de dois ou mais materiais distintos. Os compósitos mais utilizados são os compósitos reforçados com fibra, que resultam da junção de fibras num material aglomerante, designado por matriz [2].

Já nos primórdios da história da humanidade se utilizavam de certa forma materiais compósitos na construção das habitações, usando tijolos de argila reforçados com fibras de palha [2]. Os materiais compósitos utilizados actualmente podem ter matrizes poliméricas ou metálicas. No caso das matrizes poliméricas as mais comuns são as fenólicas e as epóxicas. No que diz respeito as fibras de reforço as mais utilizadas são as de carbono, de vidro e aramidas [2].

Sendo materiais estruturais, a necessidade de ligação de materiais compósitos com outro tipo material é essencial. Em materiais compósitos os métodos de ligação usados são os adesivos e as ligações aparafusadas e rebitadas. Para o processo de ligações aparafusadas e rebitadas é necessário um pré-processo de operação de furação. Este processo de furação origina no material compósito um dano denominado de delaminação. Para que a ligação entre os materiais seja eficiente e resistente é necessário que o dano seja mínimo e que exista uma boa precisão ao nível do furo [1]. Vários estudos foram feitos com o objectivo de minimizar esse dano e determinar quais as variáveis que influenciam a dimensão do dano.

1.1 Motivação

Com a evolução tecnológica, torna-se cada vez mais difícil satisfazer as exigências da indústria. Estas exigências surgem a partir do desenvolvimento de materiais e da consequente necessidade de os processar. No que diz respeito aos materiais compósitos os desafios aparecem repetidamente uma vez que estes materiais continuam a ser desenvolvidos no sentido de se aproveitarem ao máximo as características funcionais possíveis de se obter.

Por outro lado, como para o desenvolvimento de estruturas compostas por componentes produzidos em materiais compósitos é necessário proceder à sua ligação, a utilização de processos secundários, como a maquinagem, é inevitável. O processo de maquinagem de uso mais frequente em

componentes feitos de materiais compósitos é a furação para obtenção dos furos destinados às ligações rebitadas ou aparafusadas. Para que exista uma boa qualidade na ligação é necessário uma boa precisão do furo e o mínimo de dano causado pela furação [1], dado que o processo origina sempre algum tipo de dano quando se trata deste tipo de materiais. A furação é um processo cujo conhecimento está já bem consolidado no que diz respeito a materiais homogêneos, tal como os metais. No entanto, no caso dos materiais não homogêneos, como os compósitos, o processo comporta-se de forma diferente e ainda carece de investigação. Neste sentido, são essenciais a análise e desenvolvimento do processo para que se consiga melhorar o seu desempenho.

A investigação já conduzida aponta para a existência de várias variáveis significativas do processo, nomeadamente os parâmetros de corte, a espessura do componente a furar e o diâmetro da ferramenta. Quando se fixam as duas últimas variáveis é possível observar o efeito dos parâmetros de corte sobre o dano obtido e definir os respectivos modelos empíricos. No entanto, quando utilizando todas as variáveis do processo no sentido de se obter um modelo global, foi observado que a espessura da peça e o diâmetro da ferramenta são variáveis cujo efeito é tão significativo que faz com que os parâmetros de corte não o sejam. Observando o processo do ponto de vista físico, não faz sentido que os parâmetros de corte não tenham grande influência [3].

No seguimento do trabalho realizado pela Professora Carla Machado, onde se estudou modelos empíricos para quantificar o dano na maquinagem de materiais compósitos [3], de Duarte Silva onde se estudou uma metodologia de processamento de imagem para avaliação do dano induzido pela furação em CFRP [4] e de Carla Tavares onde estudou a influência da força de aperto na minimização do dano em furação a alta velocidade em materiais compósitos [5], pretende-se com este trabalho abordar novas soluções, utilizando uma metodologia mais recente, com o objectivo de verificar a influência das várias variáveis do processo na diminuição do dano.

1.2 Objectivo

O objectivo deste trabalho é o desenvolvimento de modelos estatísticos que permitam prever as variáveis de saída do processo nomeadamente a força axial, o momento torsor e o factor de delaminação a partir das variáveis do processo. No estudo os factores de entrada serão o diâmetro do furo, a espessura das placas, a velocidade de corte e o avanço por dente.

1.3 Estrutura da tese

Nesta dissertação optou-se por dividir os conteúdos em seis secções. A primeira é a introdução onde se encontra uma breve introdução ao tema, assim como a motivação e o objectivo do desenvolvimento da dissertação. Seguidamente tem-se a pesquisa bibliográfica onde é descrita em mais pormenor o que é um material compósito, os processos de furação e os danos provocados pela furação. Na terceira secção apresenta-se o método utilizado. Na quarta secção apresenta-se os equipamentos utilizados para o processo de furação e a aquisição das imagens para o tratamento de dados, as definições do material e das ferramentas utilizadas. Na quinta secção apresenta-se os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. Por último na sexta secção encontram-se as conclusões e apresentamos os trabalhos que poderão vir a ser realizados no futuro.

2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos tiveram especial evidência e desenvolvimento a partir de meados do século XX, com a necessidade da indústria adquirir materiais com melhores propriedades mecânicas. Estes materiais usados em simples objectos do quotidiano, até aplicações industriais apresentam-se num lugar de destaque no campo dos materiais de engenharia. Em relação aos materiais tradicionais os compósitos possuem propriedade bastante superiores, como maior resistência e rigidez e um menor peso específico.

Chama-se materiais compósitos a junção de dois ou mais materiais. Os mais utilizados são os compósitos reforçados com fibra que são formados por um reforço, neste caso camadas de fibra, e um material aglomerante designado por matriz.

A matriz permite manter a forma estável ao compósito, permitindo que exista uma distribuição uniforme da carga pelas fibras. Existem vários tipos de matrizes nomeadamente matriz polimérica, metálica, cerâmica e cimentosa. As matrizes mais utilizadas na indústria são as matrizes poliméricas devido à sua facilidade de processamento e baixa densidade.

As matrizes poliméricas dividem-se em dois grandes campos, as termoplásticas e termoendurecíveis. As matrizes termoplásticas apresentam uma maior resistência ao impacto, maior tenacidade e menor higroscopicidade em relação as termoendurecíveis. Podem ser processadas por injeção ou termoformação e podem ser recicladas. Um ponto negativo deve-se à maior dificuldade em impregnar completamente o reforço. As matrizes termoplásticas podem ser usadas em aplicações de varias naturezas, para aplicações não estruturais e semi-estruturais habitualmente usa-se polímeros como os polipropilenos, poliamidas e policarbonatos. No que diz respeito a compósitos avançados de alta resistência usa-se geralmente o PEEK (poli-éter-éter-cetona), poliimidas e PPS (polisulfureto de fenileno). Pode-se observar algumas propriedades típicas das matrizes termoplásticas na tabela seguinte.

Tabela 2.1- Propriedades típicas de alguns termoplásticos [2]

Polímero	Tipo	T_g (°C)	T_m (°C)	HDT (°C)		E (GPa)		Tensão de rotura, σ_u (MPa)		Deformação à rotura, ϵ_u (%)	
				NR	R	NR	R	NR	R	NR	R
PC	A	150		132	149	2.4	9.0	65	131	125	2.5
PP	C	-10	165	53	151	1.4	5.9	34	83	400	2.3
PA66	C	50	265	90	252	2.9	9.0	83	172	200	4
PSU	A	190		175	185	2.5		70	120	3	1.5
PEI	A	220		204	210		9.0		200		
PI	A	280		270	275						
PPS	C	130	280	137	265	3.3	11.0	74	130	110	1
PEEK	C	150	310	148	286		9.0	98	190		

A amorfo; C semicristalino; R reforçado com 30 % em peso de fibra curta de vidro; NR não reforçado

As matrizes termoendurecíveis têm uma grande vantagem, devido a sua baixa viscosidade em comparação com as termoplásticas possuem uma maior facilidade de impregnação do reforço. Estes polímeros normalmente chamados de resinas termoendurecíveis necessitam de aplicação de temperatura e pressão para efectuar a cura. A cura é um processo onde a resina constitui a sua estrutura tridimensional. Em alguns casos a cura pode efectuar se a temperatura ambiente. As matrizes termoendurecíveis podem ser também divididas em vários grupos, para aplicações não estruturais e semi-estruturais as resinas mais utilizadas são as de poliésteres insaturados, de vinilester e as fenólicas. Para aplicações de alta resistência utilizam-se as epóxicas, as bismaleimidas e as poliimidas. Pode-se observar algumas propriedades típicas das matrizes termoendurecíveis na tabela seguinte.

Tabela 2.2 – Propriedades de resinas termoendurecíveis [2]

Resina		HDT (°C)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
Poliéster	Ortoftálica	66	3.6	55	2.0
	Ortoftálica	95	3.3	70	3.5
	Isoftálica	93	4.1	65	2.5
	Isoftálica	125	3.7	55	1.5
Fenólica	Ressol	250	2.0	32	1.8
	Bisfenol A	102	3.5	82	6.0
Vinilester	Novolac	150	3.5	68	3.5
	$T_c = 20^\circ\text{C}$	62	3.2	62	2.0
Epóxicas DGEBA	$T_c = 120^\circ\text{C}$	121	3.0	90	8.0
	$T_c = 120^\circ\text{C}$	110	4.1	125	5.0
Epóxida DGEBF					

A matriz utilizada no estudo é à base de resina epóxida. A resina epóxida apresenta uma grande variedade de formulações químicas, necessitando para o seu processo de cura um agente endurecedor, normalmente como agentes são utilizados as aminas alifáticas, aromáticas ou algumas polimidas.

Apesar de ser uma resina com um custo mais elevado em comparação com as outras resinas termoendurecíveis apresenta propriedades bastante interessantes. Como principais vantagens apresenta uma elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química, boas propriedades de adesão à fibra, processo de cura sem libertação de voláteis, grande estabilidade dimensional, baixa absorção de água e temperaturas de funcionamento em torno de 100 e 220 °C. Por outro lado as formulações de base são um pouco frágeis, mas é possível contrariar este defeito através da junção de aditivos de alta tenacidade.

No caso do reforço as fibras mais usadas em compósitos de matriz polimérica são as fibras de carbono, as de vidro e as aramidas. As fibras apresentam melhores propriedades mecânicas que o correspondente material maciço, razão pelo qual os compósitos possuem maior rigidez e resistência que os materiais tradicionais, como se pode observar na tabela 2.3. Este facto foi apresentado por Griffin [6].

Tabela 2.3 – Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça [2]

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tracção, σ_u (GPa)	Densidade, ρ (kg/dm ³)	Módulo específico, E/ρ	Resistência específica, σ_u/ρ
Fibras:					
Vidro E	72	3.5	2.54	28.5	1.38
Vidro S	87	4.3	2.49	35.0	1.70
Carbono (Pitch CP-	690	2.2	2.15	321	1.00
Carbono (PAN C	345	2.3	1.85	186	1.24
Boro	393	3.1	2.70	146	1.15
Sílica	72.4	5.8	2.19	33	2.65
Tungsténio	414	4.2	19.3	21	0.22
Berílio	240	1.3	1.83	131	0.71
Kevlar® 49	131	3.6	1.45	90	2.48
Materiais convencionais:					
Aço	210	0.34 – 2.1	7.8	26.9	0.043 – 0.27
Ligas de Al	70	0.14 – 0.62	2.7	25.9	0.052 – 0.23
Vidro	70	0.7 – 2.1	2.5	28	0.28 – 0.84
Tungsténio	350	1.1 – 4.1	19.3	18.1	0.057 – 0.21
Berílio	300	0.7	1.83	164	0.38

Os reforços podem ser apresentados de várias maneiras: em *roving*, constituído por um cordão de filamentos contínuos enrolado numa bobine, em mantas e em tecidos, os tecidos entrelaçados mais comuns são os *plane weave*, *twill weave* e *satin weave*.

O reforço utilizado neste estudo são as fibras de carbono. As fibras de carbono podem conter entre 80 a 95% de carbono, as mais usuais, ou 99% de carbono as chamadas fibras de grafite, estas últimas são geralmente utilizadas em situações com maior exigência mecânica. Estas fibras possuem uma característica bastante interessante, possui um coeficiente de dilatação é negativo ou nulo. Esta particularidade permite que este material seja muito vantajoso em aplicações como a metrologia e aeroespacial onde pequenas variações de temperatura são bastante significativas. Por outro lado é necessário ter um certo cuidado pois conjugado com um material com um coeficiente de dilatação positivo é possível originar tensões indesejadas.

Neste caso de estudo o material utilizado para os ensaios chama-se pré-impregnado de base em resina epóxida. Os pré-impregnados são uma mistura de fibra e de resina previamente combinado. São utilizados para aplicações com maior exigência tais como a aeronáutica. Possuem propriedades interessantes ao nível do processamento, tais como a maneabilidade, auto-adesão de camadas no empilhamento, facilidade de posicionamento, boa conformabilidade à curvatura do molde, mas tem validade limitada. Os pré-impregnados têm uma validade reduzida à temperatura ambiente, tendo que ser conservados a baixas temperaturas.

Com o aumento da procura por estes materiais por parte da indústria, origina um aumento de resíduos destes componentes. Como estes materiais não são biodegradáveis causam bastante poluição ambiental e devido à grande acumulação destes componentes, novos espaços para aterros começam a ser escassos. Um outro processo de eliminação destes componentes é a incineração em fornos.

2.2 Furação em materiais compósitos

A furação em compósitos é um tema bastante importante na área da mecânica, pois na montagem de peças em estruturas, os métodos de ligação mais usados são os rebites ou ligações aparafusadas, e em ambos os caso a furação é necessária [7].

Hoje em dia existem processos bastante avançados para a furação de compósitos, como o corte por jacto de água, laser e por electroerosão. Contudo o processo de furação convencional é o mais utilizado [8]. A furação é um processo de maquinagem que engloba dois mecanismos, o primeiro é o corte efectuado pelas arestas da ferramenta, o segundo a extrusão pela ponta da ferramenta onde a velocidade de rotação é quase nula [9].

O desempenho das ligações entre compósitos depende da qualidade do furo, pois a operação de furação apresenta alguns problemas que podem afectar quer à resistência a solicitações estáticas quer à fadiga. Os materiais compósitos apresentam um comportamento não-homogéneo e anisotrópico, por isso não é possível obter a mesma qualidade conseguida nos materiais metálicos. A orientação das fibras e as diferentes propriedades mecânicas do reforço e da matriz representa uma grande dificuldade na obtenção de qualidade no furo.

Na bibliografia consultada relativa à furação convencional é uma observação comum que o dano é fortemente dependente do avanço e que a utilização de baixos valores desta variável promove menos dano, logo furos de maior qualidade. A velocidade de corte foi considerada de menor influência.

Enemuoh et al. [10] apresentaram uma metodologia para a selecção dos parâmetros de corte para minimização do dano baseada numa combinação de métodos de Taguchi e optimização multiobjectivo. Foram realizados dois estudos de caso para demonstração da eficácia da abordagem e recomendam como combinação mais adequada de parâmetros a utilização de velocidades altas e avanços baixos.

Davim e Reis [11] estudaram outra abordagem para seleccionar os parâmetros de corte, com base numa combinação de métodos de Taguchi e análise de variância. As conclusões encontradas foram que o factor de delaminação aumenta com a velocidade de rotação e com o avanço. A velocidade de rotação demonstrou ser o factor mais significativo. A mesma abordagem foi utilizada noutro estudo dos mesmos autores [12] onde concluíram que a velocidade de corte é o factor que influencia significativamente a delaminação. Em ambos os estudos, concluiu-se que o dano é maior para maiores velocidades de corte e avanço.

Outra abordagem baseada em metodologias de Taguchi e na análise de variância foi realizada por Tsao e Hocheng [13], considerando como factores de entrada o avanço, a velocidade de rotação e o diâmetro da ferramenta. Observou-se que a maior contribuição em termos significativos foi dada pelo avanço e diâmetro da ferramenta, e a velocidade de rotação foi pouco significativa.

Sardinas et al. [14] discutiram a selecção dos parâmetros de corte para a furação de material compósito reforçado com fibra de carbono, utilizando optimização multiobjectivo, a fim de melhorar duas respostas: taxa de remoção de material e delaminação. Os modelos desenvolvidos mostram que tanto o avanço como a velocidade têm influência sobre o dano. Analisando os resultados do processo de optimização, concluíram que maiores taxas de remoção de material implicam maior delaminação.

Tsao [15] investigou as interacções entre os factores de entrada (velocidade de rotação, avanço, espessura da ferramenta e tamanho do grão de diamante) na furação de material reforçado com fibra de carbono com uma broca de coroa, utilizando a metodologia de Taguchi. As suas conclusões indicam que a espessura e o avanço foram os factores mais significativos do processo e que, em geral, a delaminação é menor quando se utilizam velocidade alta e avanço baixo.

Shyha et al. [16] conduziram um estudo para verificar a influência dos parâmetros de corte do processo de furação (velocidade de corte e avanço) e geometria da broca ($d = 1,5$ mm) sobre a vida da ferramenta e qualidade do furo, utilizando a metodologia de Taguchi com análise de variância (ANOVA). A geometria da broca e o avanço foram as variáveis mais significativas para ambas respostas.

Sedlacek e Slany [17] investigaram o efeito de parâmetros de processo da furação sobre a delaminação utilizando um Planeamento de Experiências (DOE). Este desenho de experiências

baseou-se num planeamento factorial completo com quatro factores a dois níveis. Os factores utilizados foram o avanço, a geometria da ferramenta, a velocidade de corte e o desgaste da ferramenta. A sequência de factores significativos obtidos foi: avanço, desgaste da ferramenta, geometria da ferramenta e velocidade de corte.

Curnick [18] seguiu a via da experimentação tradicional realizando ensaios relativos a 9 combinações de 3 níveis de cada parâmetro de corte, velocidade de rotação e avanço. Verificou que a delaminação aumenta com o aumento do avanço e diminui com o aumento da velocidade de rotação.

No que diz respeito à furação a alta velocidade os trabalhos de investigação encontrados na pesquisa bibliográfica foram os que se apresentam em seguida.

Lin e Chen [19][20] estudaram o efeito do aumento da velocidade de rotação (até 38650 rev/min) sobre a força axial, o binário, o desgaste da ferramenta e a qualidade dos furos obtidos. Foram utilizadas duas geometrias de ferramentas diferentes com o mesmo diâmetro, e concluíram que o efeito do aumento da velocidade de corte é diferente para as duas geometrias. O desgaste da ferramenta aumenta significativamente com o aumento da velocidade de rotação. No entanto, foi obtida uma qualidade do furo aceitável porque foram utilizados avanços relativamente pequenos (0.03-0.07 mm/rev).

Krishnaraj et al. [21] utilizaram métodos de Taguchi e análise de variância (ANOVA) para investigar as características de diferentes geometrias de ferramentas, e estabeleceram relações entre a velocidade de rotação (14 000-19 000 rev/min) e avanço (0.02-0.08 mm/rev) sobre a força axial e a rugosidade superficial. Verificaram que a utilização de geometrias especiais pode melhorar a qualidade do furo. As principais conclusões sobre os parâmetros de corte foram que o avanço é fortemente influente na força axial e rugosidade superficial e que aumentando a velocidade de rotação a rugosidade superficial é mais baixa.

Gaitonde et al. [22] realizaram a investigação dos efeitos dos parâmetros de processo (velocidade de corte, avanço e ângulo de ponta da broca) sobre a delaminação utilizando metodologia de resposta em superfície (RSM). As observações mostraram que a furação a alta velocidade desempenha um papel importante na redução do dano na entrada do furo e que o factor de delaminação é inferior com avanços e ângulos de ponta mais baixos.

Campos Rubio et al. [23] investigaram o efeito dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) e geometria da ferramenta na delaminação originada em furação a alta velocidade [Velocidade de rotação 4 000-40 000 rev/min; Avanço: 0.25-2.25 mm/rev] e verificaram que, utilizando valores de velocidade de rotação até 8 000 rev/min, a delaminação diminui com o aumento da velocidade de rotação e aumenta com o avanço. Para a velocidade de rotação mais

elevada (40 000 rev/min), o avanço não parece ter influência apreciável na delaminação. A principal conclusão deste trabalho foi que as velocidades de rotação mais altas devem ser utilizadas quando se pretende maior taxa de remoção de material, porque a delaminação é baixa, independentemente do avanço usado.

Karnik et al. [24] analisaram a delaminação em furação a alta velocidade através do desenvolvimento de um modelo de rede neural artificial (ANN), considerando a velocidade de rotação (4 000-40 000 rev/min), o avanço (0.025-2.25 mm/rev) e o ângulo de ponta da broca (85°-130°) como factores de entrada. Os principais efeitos das variáveis foram analisados de forma independente, ou seja, mantendo as outras variáveis constantes. Verificou-se que todos os parâmetros têm influência sobre a delaminação e que a minimização do dano é obtida para uma combinação de velocidade de rotação alta, avanço baixo e ângulo de ponta baixo. Observaram também que a utilização de velocidades de rotação da ordem das 40 000 rev/min é vantajosa uma vez que há uma redução da delaminação à entrada dos furos.

Rawat e Attia [25],[26] investigaram os mecanismos de desgaste de brocas de carboneto de tungstênio durante a furação a alta velocidade de materiais compósitos reforçados com carbono. Usando o conceito de mapas de maquinabilidade, estabeleceram o efeito da velocidade (1 500-15 000 rev/min) e avanço (0.02-0.2 mm/rev) sobre os mecanismos do dano. As observações mostraram que o efeito da força axial é significativo sobre o desgaste da ferramenta e a qualidade do furo final e que a delaminação aumenta com o aumento do desgaste da ferramenta. A partir dos mapas de maquinabilidade, concluíram que as condições de corte ideais para mínimo dano e máxima produtividade são $S = 8500 \text{ rev/min}$ e $f = 0.1 \text{ mm/rev}$.

Iliescu et al. [27] avaliaram a força axial na furação a alta velocidade e desenvolveram um modelo relacionando a força axial, os parâmetros de corte e o desgaste da ferramenta. As condições de furação a alta velocidade foram obtidas utilizando $S = 12\ 000 \text{ rev/min}$ e $f = 0.05 \text{ mm/rev}$. Foi observado que a força axial aumenta com o desgaste da ferramenta e que a velocidade de rotação não tem muita influência nesta resposta. As conclusões indicam que para aumentar a vida útil da ferramenta sem que ocorram danos importantes os parâmetros de corte deverão ser $S = 9\ 000 \text{ rev/min}$ e $f = 0.05 \text{ mm/rev}$.

Krishnaraj et al. [21] investigaram a furação a alta velocidade de laminados finos ($t = 2 \text{ mm}$), variando os parâmetros de corte, ou seja, a velocidade de rotação (12 000, 16 000 e 20 000 rev/min) e o avanço (0.01, 0.05, 0.1 e 0.3 mm/rev) para determinar as condições de corte ótimas para minimização do dano. Concluíram que os parâmetros ótimos são $S = 12\ 000 \text{ rev/min}$ e $f = 0.137 \text{ mm/rev}$. Para além disso, o avanço tem grande influência na força axial, na delaminação à saída e no diâmetro do furo obtido. A utilização de valores mais elevados de avanço resulta em

diâmetros dos furos mais próximos do diâmetro nominal. Nem a velocidade de rotação nem o avanço mostraram influência significativa sobre a delaminação.

Deve ser salientado o facto de, em todos estes trabalhos de investigação, quer o diâmetro da ferramenta quer a espessura dos provetes ter sido mantido constante em todos os ensaios, nunca tendo sido considerados como variáveis de processo.

Machado [3] investigou os efeitos das variáveis do processo de furação a alta velocidade sobre o dano produzido e a força axial. Utilizando a metodologia de resposta em superfície (RSM), estabeleceu modelos empíricos que relacionam o dano de delaminação e a força axial com os parâmetros do processo, designadamente a velocidade de rotação, o avanço por dente, o diâmetro da ferramenta e a espessura da peça. Verificou ainda que é possível obter baixos valores de delaminação utilizando avanços altos.

No entanto, o modelo estatístico de previsão do factor de delaminação demonstrou algumas fraquezas. Como a metodologia faculta resultados apenas do ponto de vista matemático e estatístico, ao analisar o processo do ponto de vista dos fenómenos físicos verificou-se a existência de inconsistência do modelo. Neste caso, estatisticamente, o efeito do diâmetro da ferramenta e da espessura da peça mostrou-se tão significativo que tornou pouco perceptível o efeito dos parâmetros de corte, o que indica que os modelos empíricos devem ser melhorados e aponta como hipótese a utilização do método de Taguchi com características dinâmicas, que analisa essas variáveis separadamente, apesar de considerar todas no mesmo modelo.

Foi ainda desenvolvido um novo sistema de fixação da peça e os resultados mostraram-se promissores, uma vez que, nas mesmas condições de corte, se conseguiu reduzir significativamente o dano. Este dispositivo foi estudado com maior detalhe por Tavares [5], que concluiu que a força de aperto tem grande influência na redução do dano dado ter provado diminuir a ocorrência do dano independentemente da espessura do componente. A maior redução do dano foi registada quando se utilizou uma força de aperto de 4 kN. A utilização deste sistema de fixação permite obter uma forma mais regular do dano.

2.3 Danos decorrentes da furação

O processo de furação em compósitos origina diversos defeitos no material, como por exemplo a delaminação, fissuras interlaminares, deslocamento da fibra ou da matriz e danos de origem térmica. De maneira a diminuir o aparecimento de danos mecânicos e térmicos o processo de furação deve ser efectuado com algum cuidado [7].

Este estudo irá focar-se na delaminação, visto que é o dano mais importante na furação em compósitos. A delaminação pode causar o colapso prematuro das estruturas em serviço. Este tipo de defeito é verificado maioritariamente nas regiões interlaminares, ou seja, na junção de duas camadas de fibra. Podemos assumir que este tipo de defeito vai depender não só no tipo de fibra mas também nas propriedades da matriz utilizada [7]. O processo de furação provoca tanto à entrada como à saída a chamada delaminação. À entrada é derivado ao maior filete de corte da broca, que ao entrar em contacto com a primeira camada de fibra promove o arrancamento das restantes camadas superiores. À saída a força axial exercida pela broca origina o efeito semelhante a um punção provocando a delaminação nas camadas inferiores.

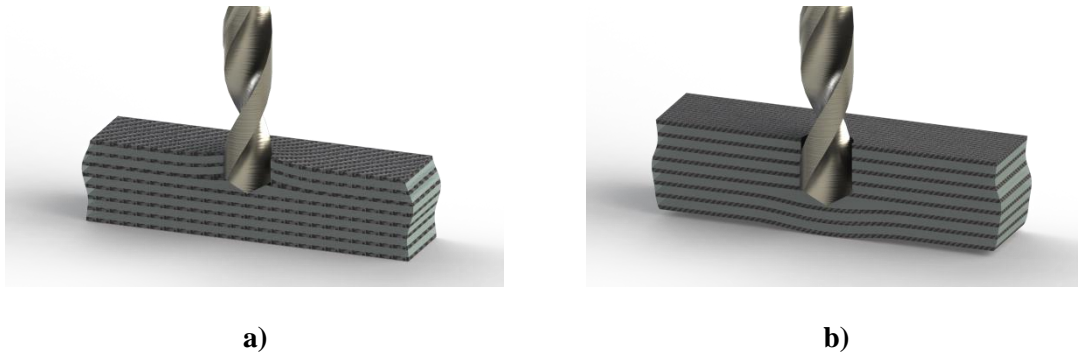


Figura 2.1 – Delaminação: a) à entrada; b) à saída [32]

Para o estudo da extensão da delaminação recorre-se à clássica teoria das placas à flexão e mecânica de fractura [28]. Para que ocorra delaminação é necessário que a força axial, que está relacionada com propriedades do material, exceda a resistência interlaminar da placa. A essa força chama-se força crítica. Hocheng e Tsao [28] foram os primeiros a estudar um modelo analítico para determinar a força crítica através da expressão

$$F_{crit} = \pi \left(\frac{8G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde a variável G_{IC} a taxa crítica de libertação de energia em modo I, isto é, em que a força é aplicada perpendicularmente ao plano de propagação de delaminação, E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson da placa e h a espessura não cortada.

Para avaliar o nível de delaminação à volta do furo pode-se recorrer a vários métodos já propostos. Mehta et. al [29] propôs um parâmetro que pode ser utilizado com este fim, o Rácio de Dano, DRAT.

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}} \quad \text{Equação 2.2}$$

em que D_{MAR} é a área delaminada e D_{AVG} é a área nominal do furo.

Outro parâmetro proposto por Chen [30] designado por factor de delaminação, avalia também a extensão da zona delaminada através da expressão:

$$F_D = \frac{D_{Max}}{D_0} \quad \text{Equação 2.3}$$

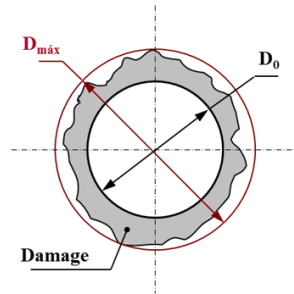


Figura 2.2 – Caracterização do dano segundo Chen [31]

Onde D_{Max} é o diâmetro máximo delaminado e D_0 é o diâmetro nominal do furo.

Chen estudou a variação deste factor na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono unidireccional e concluiu que existia uma relação aproximadamente linear entre a força axial durante o corte e o valor do factor de delaminação. Este método encontra uma limitação quando a área do círculo que enquadra o dano for muito maior que o dano. Para contornar este problema Davim et al. propuseram que a extensão da zona delaminada fosse determinada pelo factor de delaminação ajustado [32].

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde F_d é o factor de delaminação apresentado por Chen, A_d a área do dano, A_{\max} a área correspondente ao D_{\max} e A_0 a área nominal do furo.

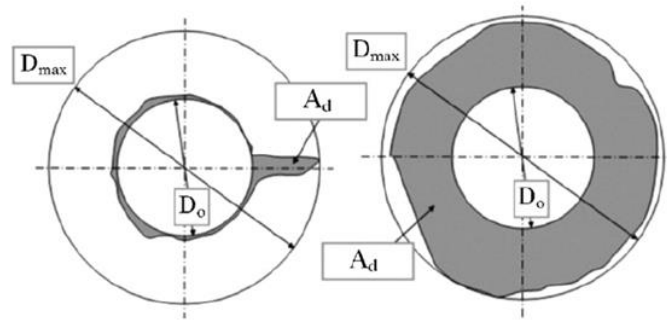


Figura 2.3 – Caracterização do dano segundo Davim [32]

3 METODOLOGIA

3.1 Métodos de Taguchi

Genichi Taguchi, engenheiro e estatístico japonês, desenvolveu uma filosofia e uma metodologia para o desenvolvimento da qualidade baseadas em conceitos estatísticos, especialmente no desenho de experiências, cujo objectivo é reduzir a variação de um processo ou produto [33].

Desde 1960, os métodos Taguchi têm sido utilizados para melhorar a qualidade de produtos japoneses. Durante a década de 1980, muitas empresas perceberam finalmente que os velhos métodos para garantir a qualidade não eram competitivos com os métodos japoneses. Os velhos métodos baseavam-se na inspecção dos produtos à medida que saiam da linha de produção e rejeitavam os produtos que não se enquadram dentro de um determinado intervalo de confiança. No entanto, Taguchi concluiu que métodos através da inspecção do produto não melhorava a sua qualidade, a qualidade tem de ser concebida a partir do início de concepção de um produto.

Os métodos de desenho de experiência tradicionais são bastante complicados e difíceis de usar. Nesses desenhos é necessário um número elevado de experiências, à medida que o número de factores aumenta. De maneira a reduzir o número de ensaios, Taguchi desenvolveu um método robusto, que utiliza um modelo especial de matrizes ortogonais para estudar os vários factores com um pequeno número de experiências.

O que é um projecto robusto? Um projecto robusto é “uma metodologia utilizada em engenharia para melhorar produtividade durante a pesquisa e desenvolvimento de modo que os produtos de alta qualidade possam ser produzidos rapidamente e a baixo custo ” [34]. O objectivo de um projecto robusto é melhorar a qualidade de um produto, minimizando os efeitos das variações, sem os factores de ruído (uma vez que são difíceis de controlar). O resultado final é um projecto que tem uma reduzida sensibilidade a variações devido a factores incontroláveis.

O método de Taguchi é baseado em ferramentas estatísticas convencionais juntamente com algumas directrizes que permitem a criação do planeamento de experiências e analisar os resultados dessas experiências. A abordagem de Taguchi para o controlo da qualidade é aplicado em todo o processo de desenvolvimento e produção de um produto, desde o conceito inicial, passando pelo projecto de desenvolvimento até à sua produção.

Taguchi considera três tipos de variáveis/factores no planeamento de experiências: factores controláveis (que afectam a variação da resposta), factores de sinal (que afectam a média) e factores de ruído (que também afectam a variação da resposta). Os factores controláveis são as variáveis que são seleccionadas e mantidas constantes durante todo o processo. Os factores de

ruído são variáveis difíceis de controlar e variam sistematicamente durante o processo. O ruído pode ser externo, como condições de temperatura ou humidade, ou interno, como por exemplo problemas causados pelas máquinas no processo de produção [35].

O principal objectivo do planeamento de experiências é determinar os níveis de factores controláveis de modo a maximizar o desempenho e a qualidade de produtos e processos.

Na metodologia de Taguchi o desenho de experiências é baseado na utilização de matrizes ortogonais. Nas matrizes ortogonais cada coluna é ortogonal entre si. A utilização destas matrizes permite obter informação significativa a partir de uma amostra de dados, o que torna bastante mais económico pois não é necessário efectuar as combinações para todos os factores. Normalmente utiliza-se dois ou três níveis de factores de estudo. No caso de serem dois níveis de estudo as matrizes mais utilizadas são as L_8 , L_{12} e L_{16} . Para três níveis geralmente utilizam-se L_9 , L_{18} e L_{27} . No estudo utiliza-se uma L_9 como mostra a tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Matriz Ortogonal L9 com factores de ruído [36]

Experiências	Factores Controláveis				S/N	Média
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	S/N_1	y_1
2	1	2	2	2	S/N_2	y_2
3	1	3	3	3	S/N_3	y_3
4	2	1	2	3	S/N_4	y_4
5	2	2	3	1	S/N_5	y_5
6	2	3	1	2	S/N_6	y_6
7	3	1	3	2	S/N_7	y_7
8	3	2	1	3	S/N_8	y_8
9	3	3	2	1	S/N_9	y_9

Na escolha da matriz tem de se ter em conta alguns factores, nomeadamente o número de graus de liberdade, para que seja possível obter a informação necessária com a menor matriz possível. O número de graus de liberdade é definido como “o número de comparações entre factores ou interacções que é necessário fazer para determinar o melhor nível, e mais concretamente o quão melhor o nível é” [35].

O cálculo do número de graus de liberdade é efectuado a partir do número de níveis – 1. Quando temos uma interacção entre dois factores utiliza-se $(\text{número de níveis de A} - 1) \times (\text{número de níveis de B} - 1)$. O número de graus de liberdade de uma matriz ortogonal calcula-se multiplicando o número de colunas da matriz pelo número de graus de liberdade de cada coluna, isto é, se uma coluna tiver um factor com três níveis, então tem dois graus de liberdade.

No modelo de Taguchi podemos analisar os dados de duas maneiras diferentes, pela resposta média e pela razão sinal-ruído. A resposta média consiste na identificação dos efeitos dos factores que afectam de forma significativa a resposta média, e determinar a combinação de factores e interações que produzem o melhor resultado. Esta análise é também conhecida por ANOM (Analysis of Means).

No caso da análise razão sinal-ruído consiste na identificação dos factores que afectam a variação. Esta análise faz uma transformação dos dados, obtidos replicação das experiências, através da razão sinal ruído. Essa transformação reflecte a variação existente. Existem várias maneiras de transformar os dados em razão sinal-ruído, dependendo da característica da qualidade, Menor-é-melhor, Nominal-é-melhor e Maior-é-melhor [37].

- Menor-é-melhor (Tipo S)

$$(S / N)_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde o $(S / N)_i$ é a razão sinal-ruído da experiência i em decibéis (dB), y_{ij} é a j-ésima observação da experiência i e n é o número de observações por experiência.

- Nominal-é-melhor (Tipo N)

$$(S / N)_i = -10 \log \left(\frac{\bar{Y}_i^2}{S_i^2} - \frac{1}{n} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde $(S / N)_i$ é a razão sinal-ruído da experiência i em decibéis (dB), \bar{Y}_i^2 é a média amostral da experiência i, S_i^2 é a variância amostral da experiência i, e n é o número de observações em cada experiência.

Se o número de observações for igual em todas as experiências, a equação utilizada é a seguinte:

$$(S / N)_i = 20 \log \left(\frac{\bar{Y}_i}{S_i} \right) \quad \text{Equação 3.3}$$

- Maior-é-melhor (Tipo L)

$$(S / N)_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde $(S / N)_i$ é a razão sinal-ruído da experiência i , em decibéis (dB), y_{ij} é a j -ésima observação da experiência i e n é o número de observações por experiência.

Por fim Taguchi sugere a realização de experiências de confirmação.

3.2 Método de Taguchi com características dinâmicas

Através do método dinâmico de Taguchi é possível realizar a optimização de um sistema. O método dinâmico, quando aplicado a um desenho de experiências, permite optimizar o sistema em torno de uma função e não um número. Ou seja, permite optimizar o sistema sobre uma gama de valores e ao mesmo tempo encontrar um parâmetro independente, para ajustar a resposta [38]. As características dinâmicas são as características da qualidade de um sistema que variam de forma dinâmica, quando se altera o sinal de entrada [39].

Com as características dinâmicas conseguimos observar o efeito directo que o sinal de entrada provoca nos resultados que pretendemos obter. Temos também que ter em consideração pequenas variações nos resultados como consequência do efeito do ruído.

Considerando um processo de produção onde temos um sinal de entrada específico que é convertido em sinal de saída correspondente, se variarmos o sinal de entrada, o sinal de saída varia exactamente o mesmo valor. Podemos pensar numa fotocopiadora como exemplo, onde cada página copiada irá ter uma correspondente cópia na saída. Para percebermos melhor a relação, definimos o resultado da saída como uma consequência funcional do sistema. Assumindo que o tamanho e a cor das letras são o sinal de entrada, como consequência o tamanho e a cor das letras da cópia são o sinal de saída. É esperado que o tamanho e a cor do original seja exactamente reproduzido na cópia, assim como as partes a negrito e outras especificações. Com esta analogia, a variação dos parâmetros de entrada, letras mais escuras ou mais claras, maiores ou mais pequenas, corresponde às variações da saída.

Este método é considerado mais eficiente e directo para obter novo conhecimento e capacidade de projecto que o método de Taguchi sem características dinâmicas. Com o método estático tem-se a capacidade de determinar o conjunto de melhores parâmetros para um resultado específico. Usando o método dinâmico permite determinar os valores óptimos para obter, não um mas o conjunto completo de resultados desejados. Por exemplo em vez de pensarmos nos requisitos de um projecto

com o propósito de obtermos um sinal de saída ideal, podemos projectar um sistema que permita assegurar várias respostas dependendo do correspondente sinal de entrada [35].

Para utilizarmos o método dinâmico temos de ter em conta os factores que são importantes para o estudo, bem como os níveis que irão otimizar o processo. Para relacionarmos os parâmetros de entrada com os resultados da saída usamos a seguinte expressão matemática:

$$y = \beta(M) \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde M é o sinal de entrada, y é a resposta e β é o declive da recta da resposta.

Comparando a equação com os resultados que se obtêm, é necessário avaliar o impacto dos factores sobre a relação entre o sinal e a resposta, tendo em conta três critérios:

Sensibilidade;

Linearidade;

Variabilidade;

A sensibilidade refere-se a uma maior ou menor variação dos valores dos resultados consoante as alterações no sinal de entrada. Graticamente, a sensibilidade reflecte-se no declive da relação entre o sinal de entrada e dos resultados. No ponto de vista da sensibilidade, o ideal é que exista o maior declive possível, ou seja maior sensibilidade [35].

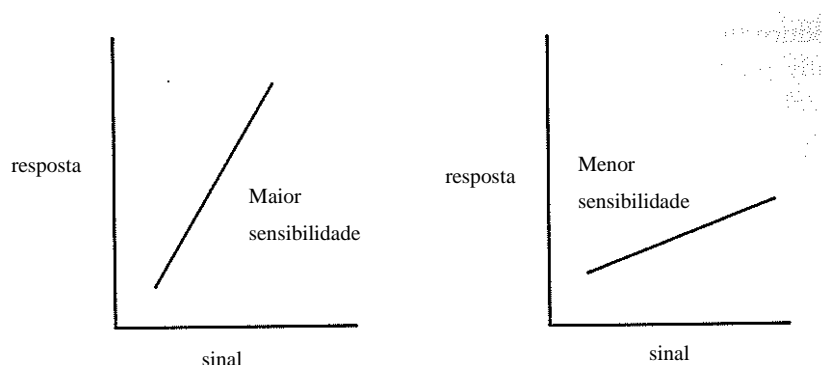


Figura 3.1– Sensibilidade [35]

A linearidade avalia se a resposta é ou não directamente proporcional ao sinal de entrada. O objectivo de seleccionar vários níveis de factores que produzam uma boa linearidade é simplificar a relação entre a resposta e o sinal de entrada. Com uma relação de linearidade entre a resposta e o

signal de entrada torna se mais fácil ajustar o sinal de entrada de maneira a produzir a resposta desejada [35].

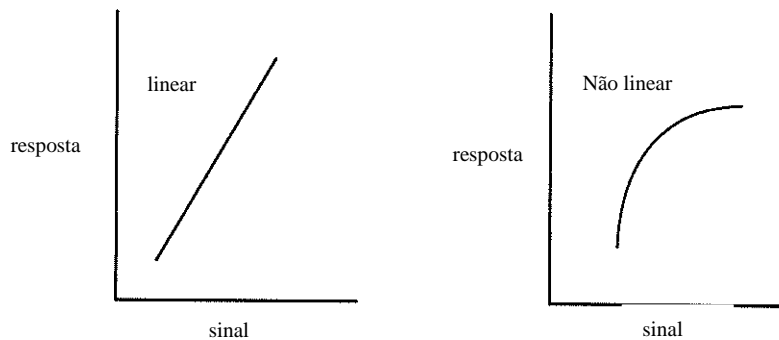


Figura 3.2 – Linearidade [35]

A Variabilidade da resposta com características dinâmicas tem em conta não só a variabilidade de um ponto específico, mas também ao longo da recta de resposta. O que significa que deve-se ter em consideração a escolha dos níveis de factores que produzam resultados próximos ao resultado esperado para um sinal de entrada específico, mas também que produza resultados próximos aos resultados projectados para os restantes sinais de entrada. Os níveis dos factores devem ser seleccionados tendo em conta mínimo de variabilidade de acordo com as alterações do sinal de entrada e robustez ao ruído [35].

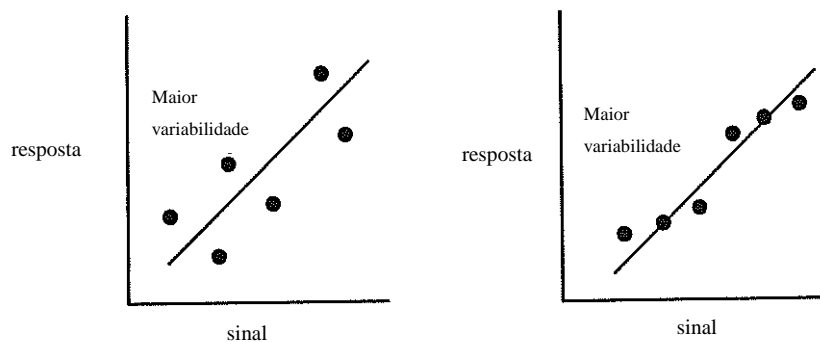


Figura 3.3 – Variabilidade [35]

Um outro aspecto que se deve de ter em conta são os diferentes tipos de factores de sinais com que se pode deparar. É importante pois o modo de cálculo da análise das características dinâmicas pode variar consoante os diferentes tipos de factores de sinais.

Dependendo da relação entre o sinal de entrada e a resposta pode-se determinar o signal-to-noise de diferentes formas, equação proporcional no ponto zero; equação proporcional num ponto de referência e equação linear.

- Equação proporcional ao ponto zero

É utilizado quando a relação entre o factor de sinal e o sinal de saída é tal que quando se traça o gráfico a sua linha de resposta passa na origem. Esta equação assume que quando o factor de sinal é zero a resposta também deve ser zero. A aplicação mais comum é quando o factor de sinal é conhecido.

Como foi apresentado em cima a equação 3.5 é a equação ideal para relacionarmos os parâmetros de entrada com os resultados.

Contudo, na realidade existem variações assim a equação mais realística é:

$$y_{ij} = \beta M_i + e_{ij} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde

$i = 1; 2; \dots; k$, em que k é o número de níveis do factor de sinal;

$j = 1; 2; \dots; r_o$, em que r_o é o número de observações por cada nível do factor de sinal;

e_{ij} corresponde a ruído branco.

E o declive é calculado pela seguinte equação:

$$\beta = \frac{1}{r} \times \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_o} M_i y_{ij} \quad \text{Equação 3.7}$$

Tem-se como objectivo determinar os melhores parâmetros que permitem obter resultados mais precisos, para isso o cálculo da razão sinal-ruído é feito para todas as experiências a partir da seguinte equação:

$$S / N = 10 \log \left(\frac{1}{r} \times \frac{S_\beta - V_e}{V_e} \right) \quad \text{Equação 3.8}$$

Para se retirar r para o cálculo do S / N utiliza-se a seguinte equação:

$$r = r_o \sum_{i=1}^k M_i^2 \quad \text{Equação 3.9}$$

A variação provocada pelo efeito linear é calculada pela seguinte expressão:

$$S_{\beta} = \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_o} M_i y_{ij})^2}{r}$$

Equação 3.10

A variância do erro é retirada da seguinte equação:

$$V_e = \frac{1}{kr_o - 1} \times S_e$$

Equação 3.11

A variação associada ao erro e à não linearidade é determinada a partir da seguinte equação:

$$S_e = S_T - S_{\beta}$$

Equação 3.12

Finalmente a soma dos quadrados total é obtida pela equação:

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_o} y_{ij}^2$$

Equação 3.13

- Equação proporcional num ponto de referência

Ao contrário da equação proporcional ao ponto zero, a equação proporcional num ponto de referência é utilizado quando a recta correspondente à relação entre o sinal e a resposta não passa na origem ou quando não é esperado que passe.

Neste caso a equação ideal é obtida pela equação:

$$y - \bar{y}_s = \beta(M - M_s) + e \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde M_s representa o ponto de referência e \bar{y}_s representa a média dos dados para o ponto de referência.

Antes do cálculo do signal-to-noise é necessário tratar a coluna dos resultados, a média dos dados para o ponto de referência é calculada pela equação:

$$\bar{y}_s = \frac{\sum_{j=1}^{r_o} y_j}{r_o} \quad \text{Equação 3.15}$$

O somatório para cada factor de sinal é determinado da seguinte forma:

$$y_k = \sum_{j=1}^{r_o} (y_j - \bar{y}_s) \quad \text{Equação 3.16}$$

Os novos resultados tratados y_{ij} são calculados da seguinte forma:

$$y_{ij} = y_j - \bar{y}_s \quad \text{Equação 3.17}$$

Assim é possível calcular o declive da recta β pela equação:

$$\beta = \frac{1}{r} \times \sum_{k=1}^n y_k (M_k - M_s) \quad \text{Equação 3.18}$$

Para determinar da razão sinal-ruído para as várias experiências utiliza-se a equação referida no exemplo anterior, com algumas alterações no cálculo das variáveis da equação.

$$S / N = 10 \log \left(\frac{1}{r} \times \frac{S_{\beta} - V_e}{V_e} \right) \quad \text{Equação 3.19}$$

À semelhança do caso anterior para o cálculo do r usamos a equação:

$$r = r_o \sum_{i=1}^k M_i^2 \quad \text{Equação 3.20}$$

A soma dos quadrados total é obtida pela equação:

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_o} (y_{ij} - \bar{y}_s)^2 \quad \text{Equação 3.21}$$

Onde y_{ij} são os resultados já tratados.

A variação provocada pelo efeito linear é calculada pela seguinte expressão:

$$S_{\beta} = \frac{(\sum_{k=1}^n y_k (M_k - M_s))^2}{r} \quad \text{Equação 3.22}$$

Como no caso anterior a variação associada ao erro e à não linearidade é determinada a partir da seguinte equação:

$$S_e = S_T - S_{\beta} \quad \text{Equação 3.23}$$

E por fim a variância do erro é retirada da seguinte equação:

$$V_e = \frac{1}{kr_o - 1} \times S_e \quad \text{Equação 3.24}$$

- Equação linear

A equação linear é baseada na equação dos quadrados mínimos e é aplicada em caso onde as equações proporcional ao ponto zero e num ponto de referência não são apropriadas. Num caso em que o valor do sinal seja conhecido considera-se em primeiro lugar a equação ponto zero e o ponto de referência, por outro lado se os valores do sinal estão muito próximo entre si, e a recta da resposta não intersecta a origem do gráfico usa-se a equação linear.

Para este caso a equação ideal é obtida pela equação:

$$y = m + \beta(M - \overline{M}) + e \quad \text{Equação 3.25}$$

Onde \overline{M} representa a média do sinal de entrada e m representa a média dos dados e e é o erro.

Para calcular o da declive da recta β usamos a equação:

$$\beta = \frac{1}{r} \times \sum_{k=1}^n y_k (M_k - \overline{M}) \quad \text{Equação 3.26}$$

Para determinarmos o \overline{M} , r e y_k usamos as seguintes expressões respectivamente:

$$\overline{M} = \frac{\sum_{i=1}^k M_i}{k} \quad \text{Equação 3.27}$$

$$r = r_o \left(\sum_{i=1}^k (M_i - \overline{M}) \right) \quad \text{Equação 3.28}$$

$$y_k = \sum_{j=1}^{r_o} y_j \quad \text{Equação 3.29}$$

Para o cálculo do signal-to-noise utilizamos a expressão dos casos anteriores.

Para determinarmos a soma total dos quadrados usamos a seguinte expressão:

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_o} y_{ij}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_o} y_{ij})^2}{kr_o}$$

Equação 3.30

A variação provocada pelo efeito linear é calculada pela seguinte expressão:

$$S_\beta = \frac{(\sum_{k=1}^n y_k (M_k - \bar{M}))^2}{r}$$

Equação 3.31

De seguida usamos as mesmas expressões utilizadas nos casos anteriores para calcular a variação associada ao erro e à não linearidade e a variância do erro.

3.3 Análise de Variância – ANOVA

A ANOVA ou Análise de Variância é o método estatístico utilizado para analisar o erro de medição e as fontes de variação do processo, atribuindo a cada uma delas um valor estimado da sua contribuição na variação total do processo

No Desenho de Experiências, a análise de variância de respostas que são variáveis contínuas pode ser feita para a média das observações e/ou para o índice Sinal-Ruído e considerando, ou não, a introdução de factores de ruído. Assim é possível analisar quais os factores que têm mais influência na resposta pretendida, o que pode contribuir para uma melhor escolha dos níveis de cada factor.

Na Análise de Variância começa-se por conhecer o efeito do factor X para n observações,

$$\text{Efeito do Factor } X = \frac{X_2 - X_1}{\frac{N \times n}{2}}$$

Equação 3.32

$$F_0 = \frac{MS_x}{MS_{erro}} = \frac{SS_x}{g.l._x \times MS_{erro}} \quad \text{Equação 3.33}$$

Onde N é o número de experiências, n o número de observações para cada combinação dos factores controláveis e $X_2 - X_1$ os valores das respostas para os níveis 2 e 1 do factor X (caso mais simples em que X só tem dois níveis) [33]

Quando se trata da resposta de S/N, havendo apenas um índice por experiência, o valor de n é igual a 1. Para avaliar a significância de um factor X, determina-se pela comparação entre o Quadrado Médio do factor e a Variância Residual.

$$F_0 = \frac{MS_x}{MS_{erro}} = \frac{SS_x}{g.l._x \times MS_{erro}} \quad \text{Equação 3.34}$$

Onde MS_{erro} é a Variância Residual, $g.l._x$ o número de graus de liberdade e SS_x a variação do factor X.

A percentagem de contribuição de um factor ou de uma interacção é definida por,

$$\rho_x = \frac{SS_x - g.l._x \times MS_{erro}}{SS_T} \quad \text{Equação 3.35}$$

A contribuição do erro é determinada pela diferença entre 100% e a soma das contribuições percentuais dos efeitos significativos na tabela ANOVA. Um valor elevado do erro pode significar que houve algum problema na experiência [33].

3.4 Resposta em Superfície

Podemos definir a metodologia de resposta em superfície como um conjunto de técnicas que permitem o estudo empírico das relações entre o conjunto de variáveis de entrada e as suas respectivas respostas. Dessas técnicas fazem parte o planeamento de experiências e a sua análise de resultados [40].

Modelo Linear

O modelo de regressão polinomial de primeiro grau é dado por:

$$Y = \beta'_0 + \sum_{i=1}^k \beta'_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k \beta'_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Equação 3.36}$$

Onde Y é a resposta do processo, e x_j são as variáveis de controlo, β'_0 , β'_i e β'_{ij} são os coeficientes do polinómio retirados através da regressão pelo método dos mínimos quadrados e ε é o erro. O termo $x_i x_j$ é utilizado para salvaguardar possíveis efeitos cruzados entre as variáveis. De maneira a facilitar o cálculo dos coeficientes do modelo, as variáveis são transformadas em variáveis codificadas, sem significado físico, que se designam por níveis.

O número de coeficientes do polinómio obtido, $n\beta'$, é dado por:

$$n\beta' = (k+1) + \frac{k(k-1)}{2} \quad \text{Equação 3.37}$$

Modelo Quadrático

O modelo de regressão polinomial de segundo grau é dado por:

$$Y = \beta'_0 + \sum_{i=1}^k \beta'_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta'_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k \beta'_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Equação 3.38}$$

Onde os coeficientes obtidos por regressão são β'_0 , β'_i , β'_{ii} e β'_{ij} . Para se obter o modelo ajustado temos de estimar os $n\beta'$ coeficientes que são:

$$n\beta' = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad \text{Equação 3.39}$$

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo irá ser demonstrado o procedimento experimental utilizado nesta dissertação, apresentando os equipamentos utilizados para o processo de furação e aquisição das imagens para o tratamento de dados, o material e ferramentas utilizadas. Irão ser também apresentados os parâmetros utilizados como factores de controlo nos ensaios.

4.1 Equipamentos e Materiais utilizados

A parte experimental deste trabalho foi realizada nos laboratórios de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT-UNL. Foi utilizado o centro de maquinagem vertical LEADWELL VMC-15 apresentado na figura 4.1. Para ser possível atingir a velocidade necessária para a realização do estudo, visto que a gama de trabalho se encontra em valores de alta velocidade, foi utilizado uma cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153 que permite atingir uma velocidade máxima de 20 000 rev/min (Figura 4.2).



Figura 4.1 - Centro de maquinagem vertical LEADWELL VMC-15



Figura 4.2 - Cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153

Para a fixação dos provetes recorreu-se ao sistema desenvolvido por Tavares [5] que consiste numa placa inferior, fixa ao equipamento de medição das forças, e uma placa superior ligada à inferior através de uma ligação aparafusada e guiada pelos pinos de guia (Figura 4.3). Nas duas placas estão colocados casquilhos que possuem um furo central com o mesmo diâmetro da ferramenta a utilizar e cuja função é garantir a tensão de contacto uniforme na área circundante ao furo de acordo com o aperto aplicado. A folga entre a ferramenta e o furo do casquilho é mantida tão pequena quanto possível para favorecer a precisão dimensional. Pretende-se assim impor uma deformação localizada, de forma a evitar o arrancamento das fibras na periferia do furo provocado pela entrada e saída da broca no material. A força de aperto usada foi de 4 kN, considerada nesse trabalho a ideal para este tipo de furação por minimizar o dano.



Figura 4.3 - Sistema de fixação

Para se obter um aperto nos provetes por parte do sistema de fixação de 4kN é utilizada uma chave dinâmométrica para o aperto dos parafusos M8. Para a conversão da força em momento de aperto é utilizada a relação 4kN – 11.24Nm, respectivamente [5]. O momento de aperto é aplicado pela chave.

A monitorização e aquisição de dados relativa à força axial foram realizadas através de um dinamómetro *Kistler 9257B* (Figura 4.4), que se encontra ligado a um amplificador de carga multicanal *Kistler 5070*. A conversão do sinal analógico em digital foi efectuada num sistema de aquisição de dados (DAQ). O sinal processado e os dados correspondentes aos valores medidos foram monitorizados através do *software LabVIEW* (Figura 4.5).



Figura 4.4 - Dinamómetro *Kistler 9257B*

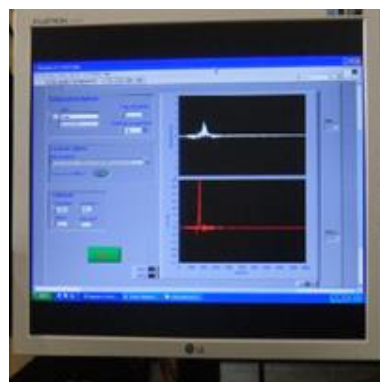


Figura 4.5 - Visualização das respostas (*LabVIEW*)

Os compósitos de fibra de carbono utilizados neste trabalho foram produzidos no Centro Formação Profissional de Setúbal (IEFP). O processamento das placas de fibra de carbono foi realizado por moldação manual, através do empilhamento de camadas de pré-impregnado num molde até perfazer as várias espessuras necessárias (2mm, 4mm e 6mm). Em seguida o material foi colocado numa estufa para curar. Foi ainda utilizado um desmoldante para que no final do processo fosse mais fácil remover as placas do molde. Após o processo de cura e o consequente arrefecimento

dos provetes, desensacamento e desmoldagem, procedeu-se ao acabamento dos mesmos. A figura 4.6 ilustra os provetes e a estufa utilizados.

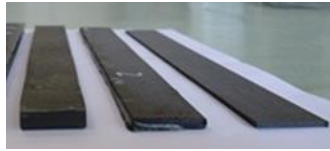


Figura 4.6 - Provetes



Figura 4.7 - Estufa

No processo de furação foram utilizadas brocas de geometria helicoidal de vários diâmetros (5mm, 7mm e 9mm) com ângulo de ponta de 120° em metal duro (K20), o que permite garantir a resistência à abrasão e ao desgaste provocadas pela furação dos compósitos de fibra de carbono (Figura 4.8). Esta é a geometria de ferramenta mais comumente usada a nível industrial.



Figura 4.8 - Brocas helicoidais utilizadas

4.2 Variáveis do Processo

Para estudar a influência das variáveis do processo sobre o dano, tem-se como factores de entrada o diâmetro da broca, a espessura da placa, a velocidade de corte e o avanço. Para cada variável são atribuídos três níveis para posteriormente se obter a combinação mais favorável.

Tabela 4.1– Variáveis do processo e correspondentes níveis.

Níveis	1	2	3
Velocidade - V (m/min)	200	250	300
Avanço - f (mm/rev)	0,1	0,15	0,2
Diâmetro da broca - d (mm)	5	7	9
Espessura da placa - t (mm)	2	4	6

No que diz respeito aos parâmetros de corte, estes foram seleccionados de forma a cumprirem os requisitos estabelecidos para a condição de alta velocidade e de acordo com os valores utilizados em estudos já efectuados que demonstraram que a utilização de avanços e velocidades de rotação nesta gama de valores contribuem para a redução do dano [22][24].

No que diz respeito aos restantes parâmetros do processo, os valores atribuídos a cada nível seguiram a metodologia linear habitual quando se realiza o desenho de experiências e o seu intervalo e valores foram condicionados pelos domínios habituais do próprio processo.

A combinação dos parâmetros de corte com o diâmetro da ferramenta e espessura dos provetes segundo a metodologia considerada produziu um total de 162 ensaios considerando 3 réplicas. Durante a realização dos ensaios fez-se sempre a monitorização e registo da força axial para obtenção da resposta.

4.3 Aquisição e tratamento de imagem

A delaminação derivada do processo de furação é difícil de analisar só por inspecção visual, por isso, para a sua análise recorreremos a técnicas de ensaio não destrutivo, mais precisamente radiografia digital.

O equipamento utilizado encontra-se nos laboratórios de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT-UNL, é um sistema de raio-X Kodak 2100 com uma energia máxima de 70 Kv, 300 KHz e corrente de 7 mA, como sistema digital de aquisição de imagem tem-se um dispositivo Kodak RVG 5100 (Figura 4.9). Para a sua correcta utilização e obtenção de imagens capazes, foram realizados vários ensaios preliminares para aferição do tempo de exposição e distância focal e concluiu-se que as

condições ideais para este caso seriam um tempo de exposição de 0.160 s e distância focal de cerca de 50 mm, o que é aceitável para o dispositivo usado sem riscos de ocorrência de zonas de penumbra.



a)



b)

Figura 4.9 - Equipamento de radiografia digital: a) Kodak 2100; b) Kodak RVG 5100

Para ser possível analisar a extensão da área delaminada através do raio-X foi necessário utilizar um líquido contrastante, o diiodometano. Os provetes foram mergulhados no diiodometano durante alguns minutos dependendo da espessura do provete.

As imagens obtidas pelo sistema de aquisição são guardadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) de alta resolução (1200×1600 pixels) para posteriormente se caracterizarem as regiões de interesse para ser possível o processamento em *Matlab*. Para processar as imagens tiradas pelo raio-X vamos utilizar o programa *Matlab*. Através de um algoritmo desenvolvido por Silva [4] obtêm-se os valores relevantes para o cálculo quantitativo do dano. Este algoritmo permite a introdução da imagem e automaticamente mede os diâmetros relevantes e calcula a área afectada pela delaminação que permite obter a listagem dos resultados pretendidos, ou seja, após a aplicação do tratamento de imagem obtiveram-se no *dataset* do *Matlab* os valores dos termos necessários ao cálculo do factor de delaminação. Na figura 4.10 ilustra-se a esquematização deste procedimento.

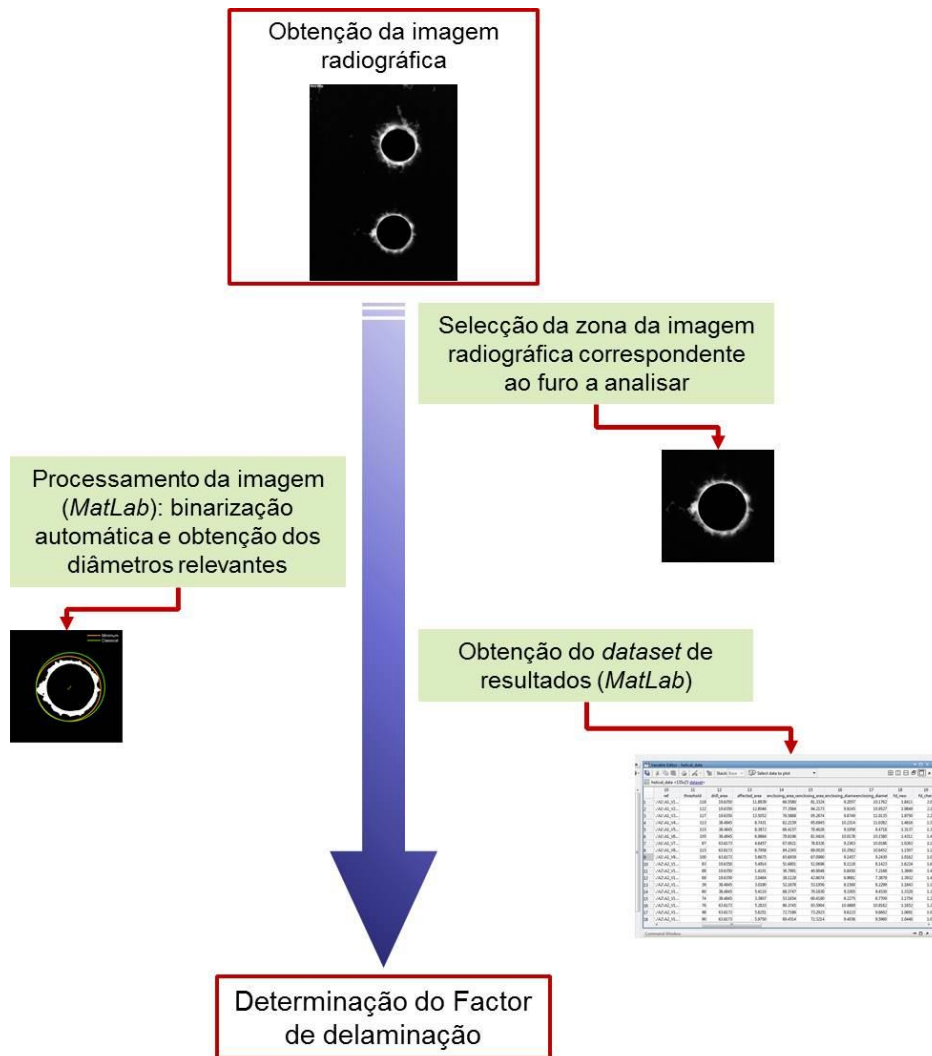


Figura 4.10 – Procedimento do processamento de imagem

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental efectuados para esta dissertação. Irá ser verificada a influência das variáveis, tais como a espessura do provete, diâmetro da broca, velocidade de corte e avanço, na força axial e factor de delaminação.

No planeamento de experiências utiliza-se uma matriz L9, irá ter três factores de controlo com três níveis diferentes, como demonstrado na tabela 5.1.

Tabela 5.1-Matriz L9

Exp	Factores de Controlo			Factores de sinal	
	A	B	C	M1	M2
1	1	1	1	M1 ₁	M2 ₁
2	1	2	2	M1 ₂	M2 ₂
3	1	3	3	M1 ₃	M2 ₃
4	2	1	2	M1 ₄	M2 ₄
5	2	2	3	M1 ₅	M2 ₅
6	2	3	1	M1 ₆	M2 ₆
7	3	1	3	M1 ₇	M2 ₇
8	3	2	1	M1 ₈	M2 ₈
9	3	3	2	M1 ₉	M2 ₉

Neste estudo irá ser utilizar dois planeamentos, onde no primeiro planeamento tem-se como factor de sinal a espessura dos provetes (t) e como factores de controlo o diâmetro da broca (d), velocidade de corte (V) e avanço (f). Como foi mostrado na tabela 4.1 terá três níveis de espessura de provetes, para cada nível iremos ter uma matriz L9 igual à tabela 5.1. Para além disso em cada planeamento fez-se três réplicas para cada nível de factor de sinal. O segundo planeamento é exactamente igual ao primeiro com a diferença do factor de sinal, que passa a ser o diâmetro da broca (d) e os factores de controlo que são a espessura do provete (t), velocidade de corte (V) e avanço (f).

A partir das seguintes figuras observamos que existe uma tendência linear para os diferentes níveis dos factores de sinal, o que indica que o método pode ser correctamente aplicado. Na figura 5.1 a tendência não é tao perceptível como na figura 5.2, mas verifica-se que existe tendência. É possível verificar que o factor de delaminação tem um comportamento dinâmico quando se altera o nível do sinal de entrada. Este comportamento verifica-se de forma mais acentuada para o factor de sinal diâmetro da broca. Neste caso quanto maior o diâmetro utilizado menor é o factor de delaminação.

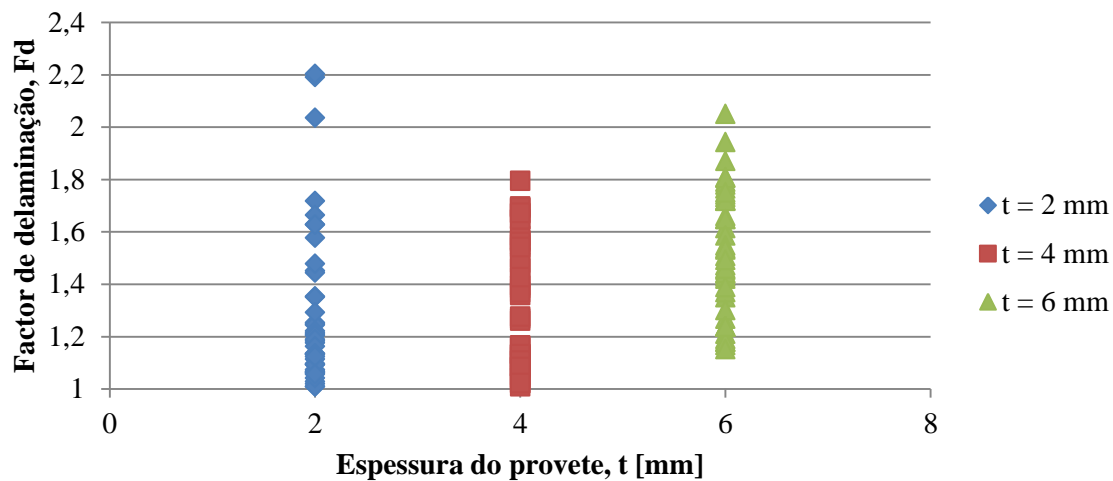


Figura 5.1 – Comparação da tendência dos valores do factor de delaminação entre as diferentes espessuras da ferramenta

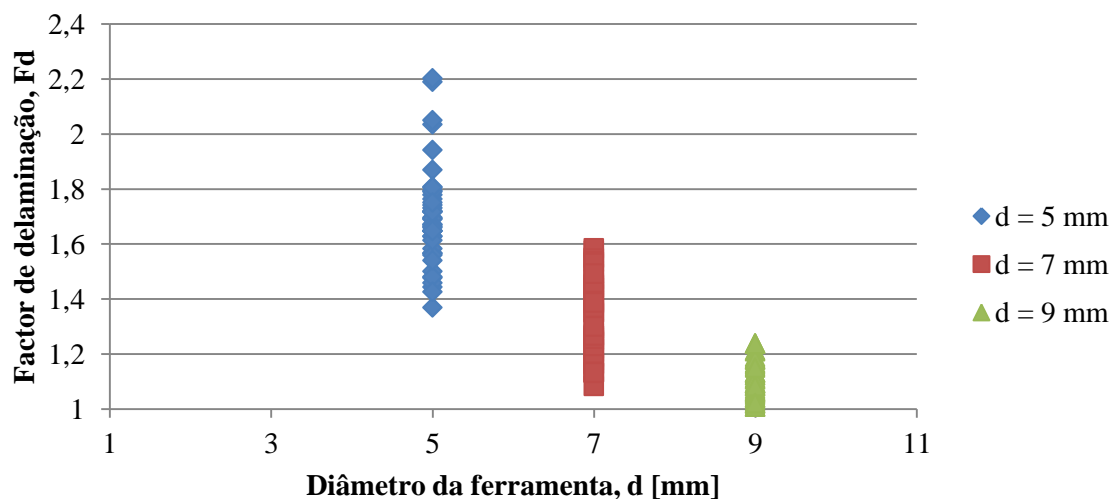


Figura 5.2 – Comparação da tendência dos valores do factor de delaminação entre os diferentes diâmetros da ferramenta

A partir do planeamento de experiências da tabela 5.2 é apresentado a média na figura 5.3, resultante das 3 réplicas, do factor de delaminação para cada experiência. Na figura 5.4 tem-se a força axial.

Tabela 5.2 – Planeamento de experiências para espessura de 2 mm

Exp	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
1	200	0,10	5
2	250	0,20	5
3	200	0,20	9
4	250	0,10	7
5	250	0,15	9
6	200	0,15	7
7	300	0,10	9
8	300	0,15	5
9	300	0,20	7

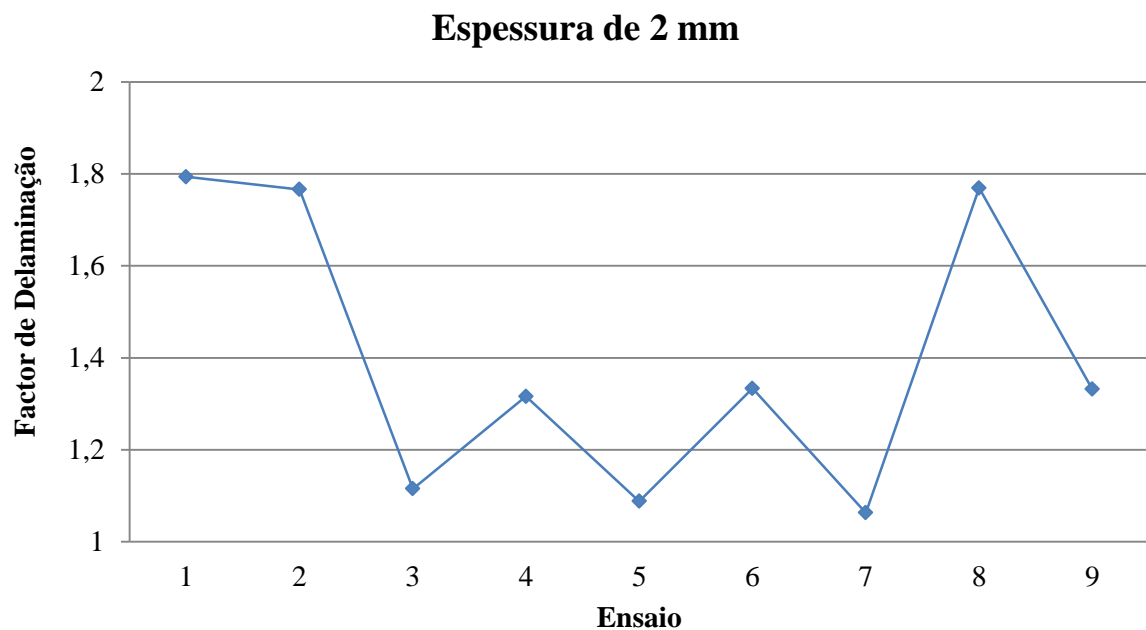


Figura 5.3 – Factor de delaminação para cada ensaio com provete de 2 mm

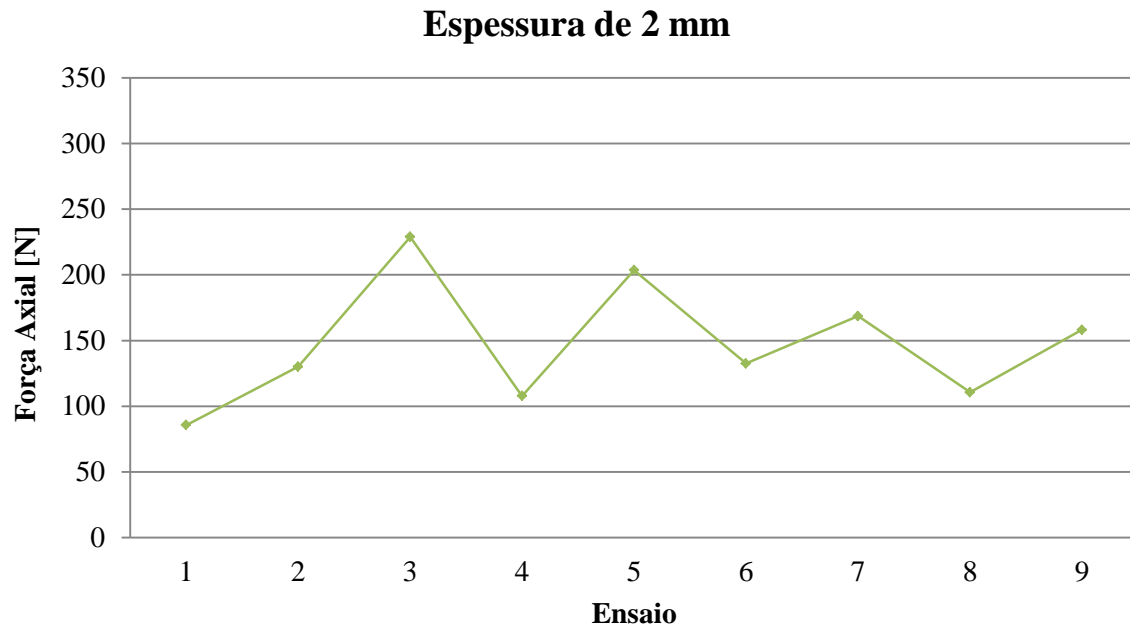


Figura 5.4– Força Axial para cada ensaio com provete de 2 mm

Em relação ao factor de delaminação pode-se verificar que o ensaio com valor menor é o ensaio número 7. Em relação à força axial é o ensaio número 1. Pela tabela 4.1 e pela tabela 5.2 pode-se verificar que os níveis dos factores de controlo são os seguintes:

Tabela 5.3- Ensaios com menor e maior valore de delaminação e força axial para provete de 2 mm

	Ensaio	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
Factor de delaminação (min)	7	300	0,1	9
Factor de delaminação (max)	1	200	0,1	5
Força Axial (min)	1	200	0,1	5
Força Axial (max)	3	200	0,2	9

Os ensaios com maior e menor valores de factor de delaminação estão representados na figura 5.5 Nesta figura pode observar-se as imagens obtidas por radiografia digital e a mesma imagem após processamento onde, a verde, se representa o diâmetro que envolve o dano.

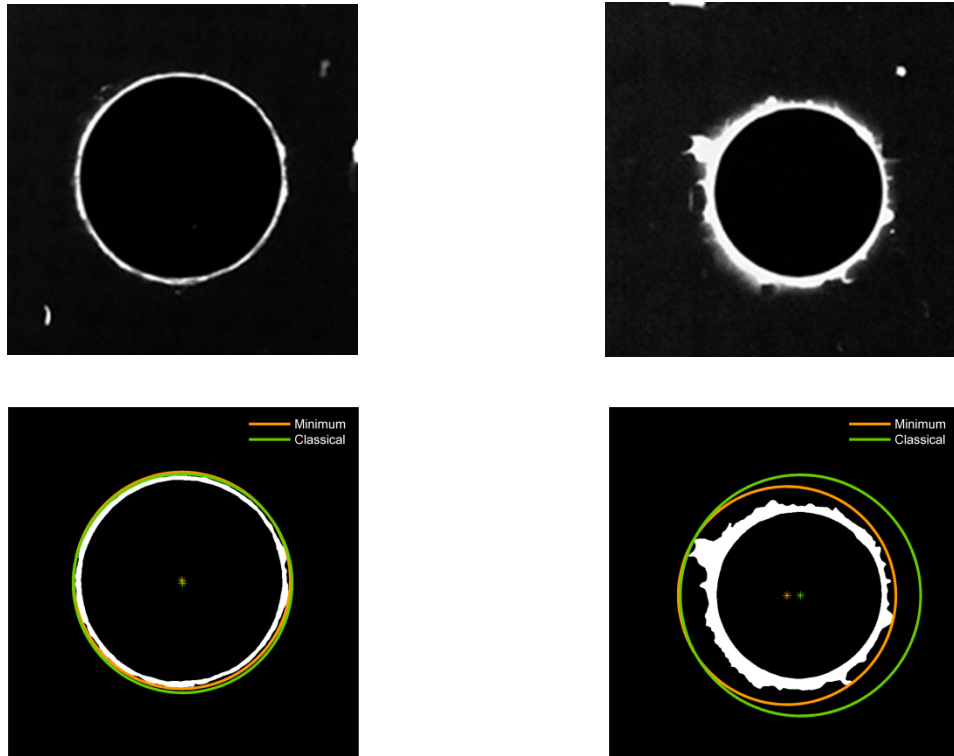
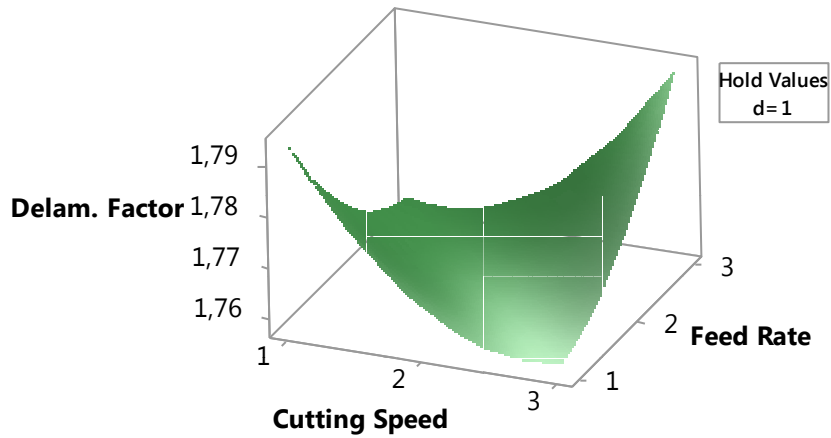


Figura 5.5 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 7); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 1)

De modo a criar um modelo empírico para descrever o processo foi usado o método de resposta em superfície através do programa *MiniTab*. A adaptação da resposta do modelo foi verificada usando o teste-F com um intervalo de confiança de 95%.

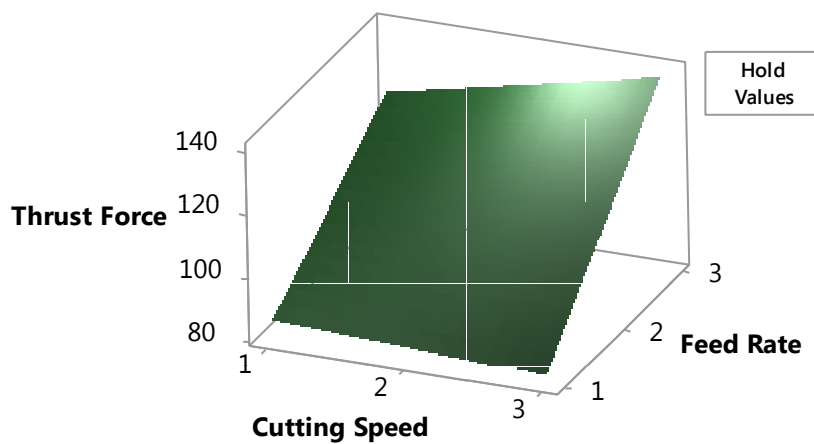
Broca de Diâmetro 5 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

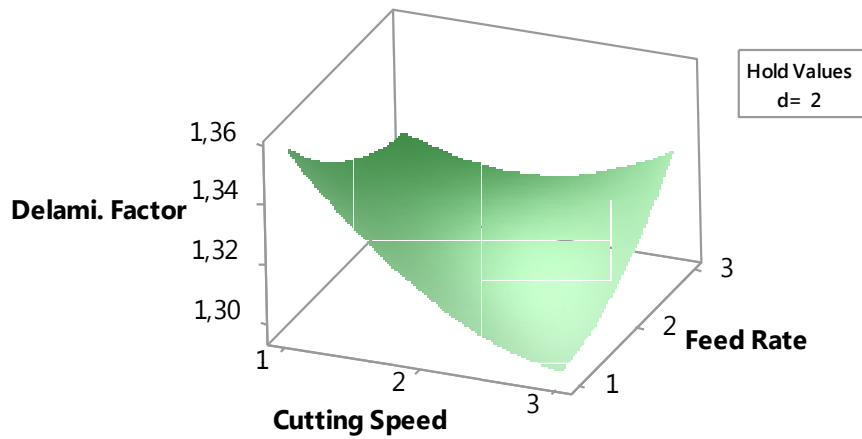


b)

Figura 5.6 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 5$ mm e $t = 2$ mm; b) força axial para $d = 5$ mm e $t = 2$ mm

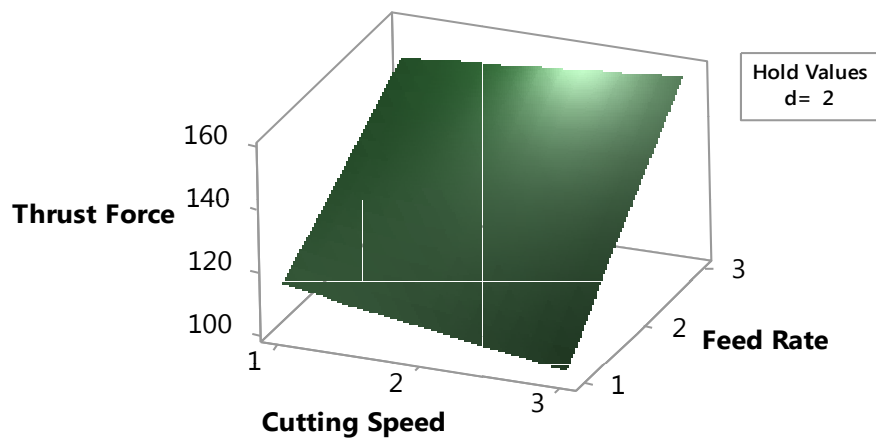
Broca de Diâmetro 7 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

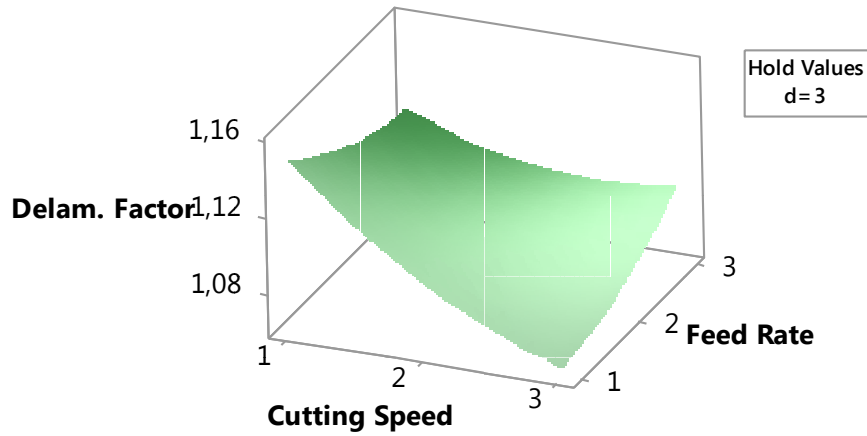


b)

Figura 5.7 - Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 7$ mm e $t = 2$ mm; b) força axial para $d = 7$ mm e $t = 2$ mm

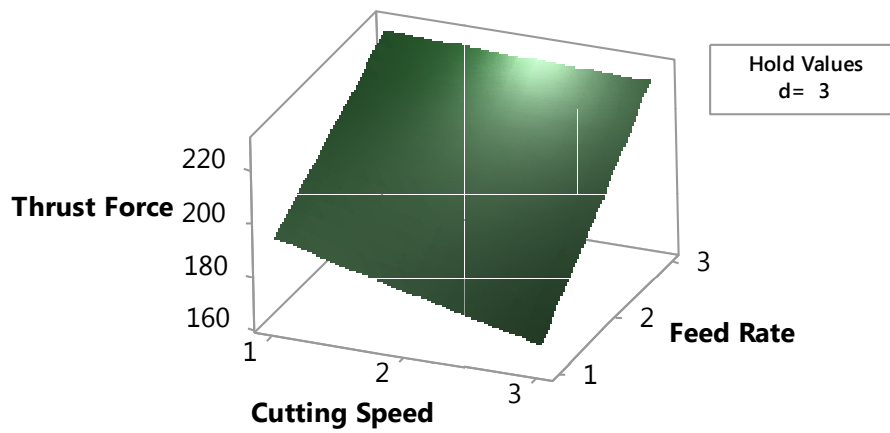
Broca de Diâmetro 9 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed



b)

Figura 5.8 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 9$ mm e $t = 2$ mm; b) força axial para $d = 9$ mm e $t = 2$ mm

Tabela 5.4 – Equações das regressões para provete de 2 mm do factor de delaminação e força axial.

Factor de delaminação $(\bar{R}^2=0.7243)$	$Fd = 2,551 - 0,066V - 0,062f - 0,766d + 0,0111V^2$ $+ 0,007f^2 + 0,114d^2 + 0,017V \times f - 0,013V \times d$
Força Axial $(\bar{R}^2=0.9848)$	$F = 90,7 - 2,7V + 11,0f - 38,4d + 0,27V^2 + 0,33f^2$ $+ 24,42d^2 + 5,40V \times f - 5,41V \times d$

Comparando os gráficos do factor de delaminação entre si verifica-se que a gama mais baixa de valores é conseguida com nível de velocidade mais alta (nível 3) e com nível de avanço mais baixo (nível 1).

Em relação ao diâmetro da broca verifica-se que a broca com nível 3 ou seja 9 mm possui o valor mais baixo de factor de delaminação.

Em relação à força axial verifica-se que para avanço mais baixo (nível 1) e com qualquer nível de velocidade de corte os valores de força axial são muito semelhantes. Por isso pode-se assumir que o menor valor se situa para avanço mais baixo (nível 1) com velocidade de corte mais baixa (nível 1). Em relação à broca a que sofreu uma menor força axial foi a broca de diâmetro de 5 mm.

Comparando o gráfico do factor de delaminação com o gráfico da força axial para o mesmo diâmetro de broca não se consegue observar uma relação directa entre estas duas respostas. Verifica-se que força axial aumenta com o aumento do diâmetro da ferramenta, o que é consistente com a teoria do corte. A combinação que provoca menos delaminação no provete de 2 mm é a velocidade de corte nível 3 (300 m/min), avanço nível 1 (0,1 mm/rev) e broca de diâmetro 9 mm.

Obteve-se também os gráficos dos resíduos para o factor de delaminação (Figura 5.9) e força axial (Figura 5.10).

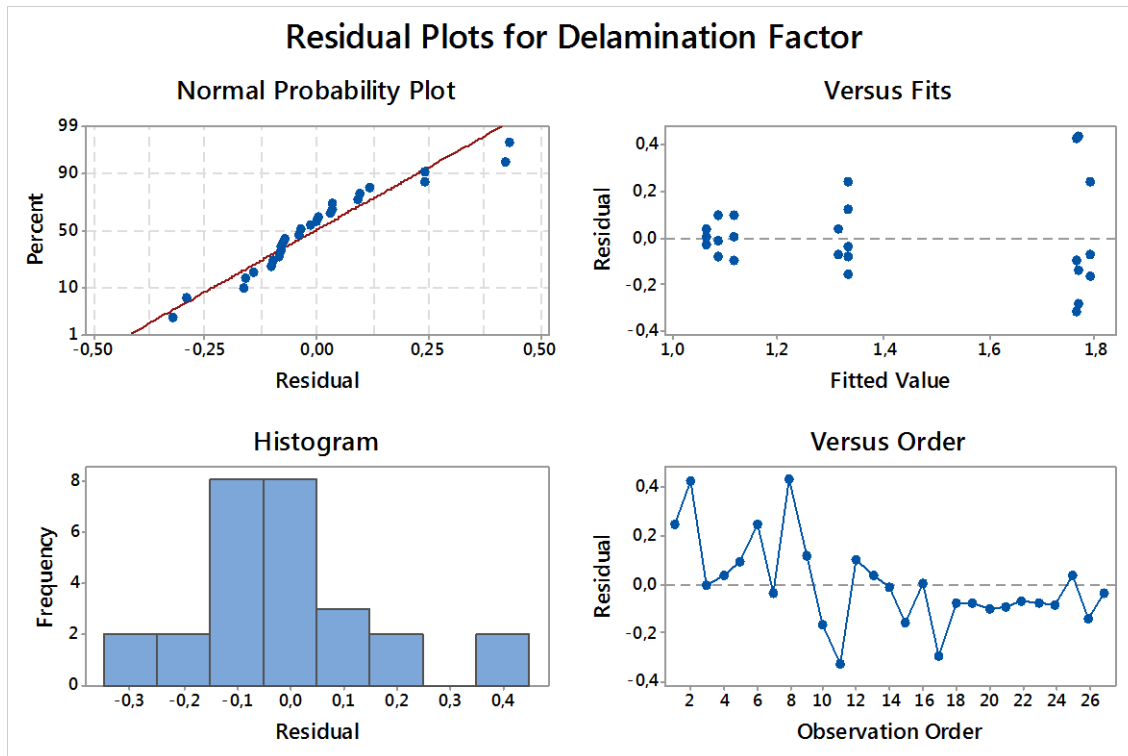


Figura 5.9 – Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura 2 mm)

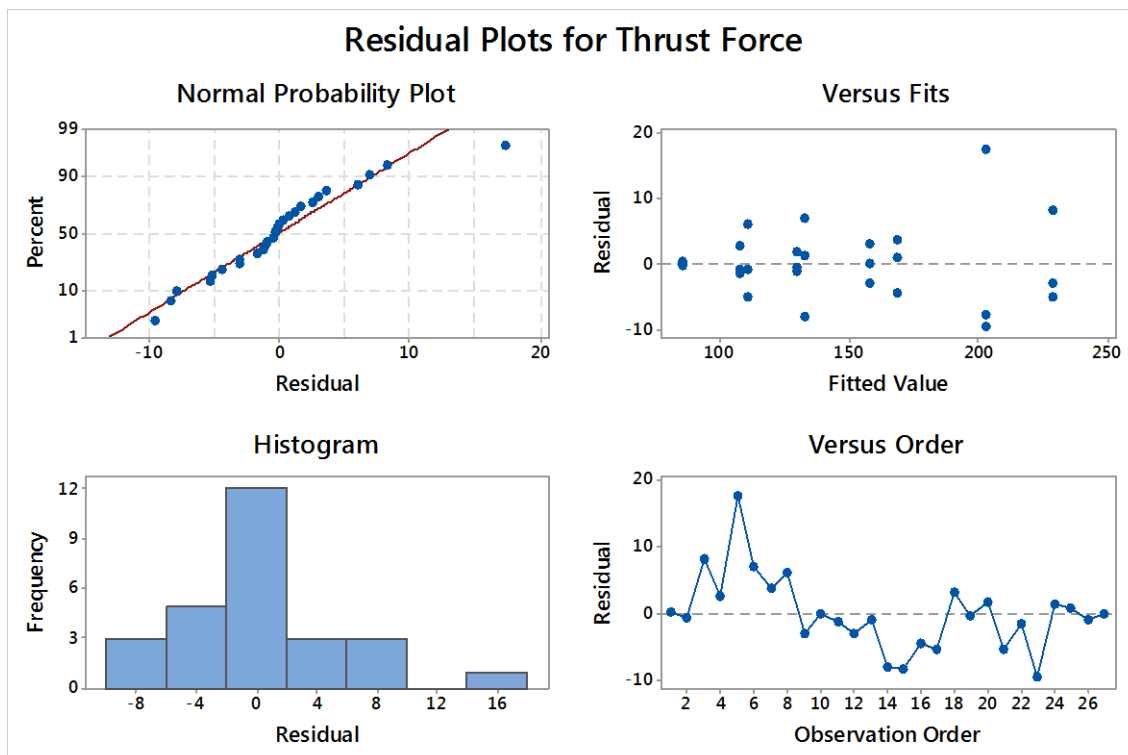


Figura 5.10 – Gráfico de resíduos para força axial (espessura 2 mm)

No gráfico de resíduos pode-se observar que segue uma tendência linear e uma distribuição normal. Observa-se também que existe um comportamento aleatório dos resíduos, mais evidente no caso da

força axial, é desejável que os pontos se distribuam de uma forma aleatória em torno da recta que corresponde ao resíduo zero.

5.1 Factor de sinal – Espessura 4mm

De forma semelhante foram retirados dos resultados para o provete de 4 mm.

Tabela 5.5 - Planeamento de experiências para espessura de 4 mm

Exp	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
1	200	0,10	5
2	200	0,15	7
3	200	0,20	9
4	250	0,10	7
5	250	0,15	9
6	250	0,20	5
7	300	0,10	9
8	300	0,15	5
9	300	0,20	7

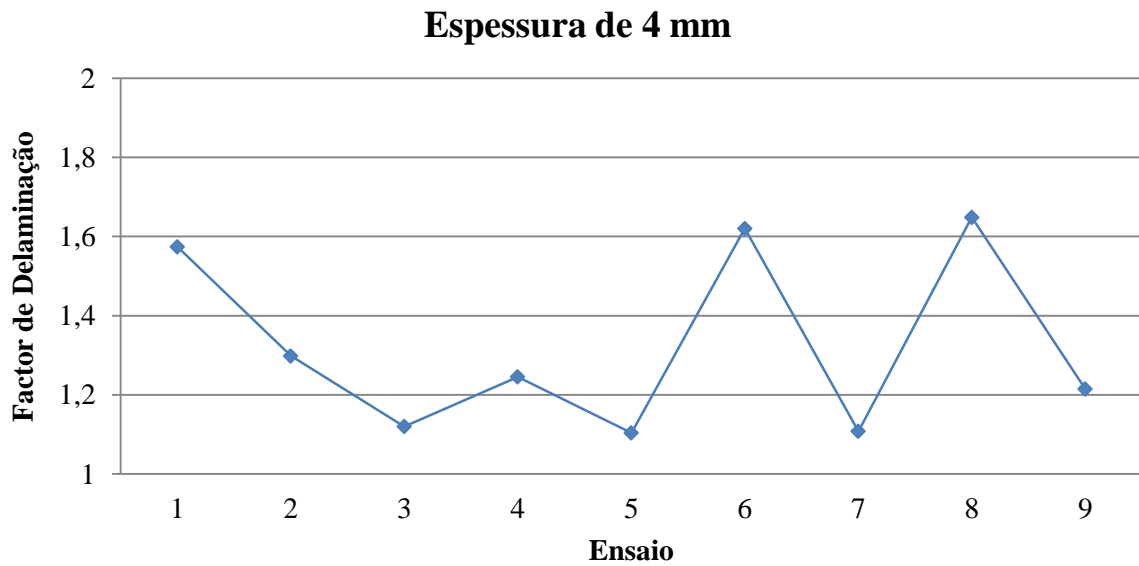


Figura 5.11 – Factor de delaminação para cada ensaio com provete de 4 mm

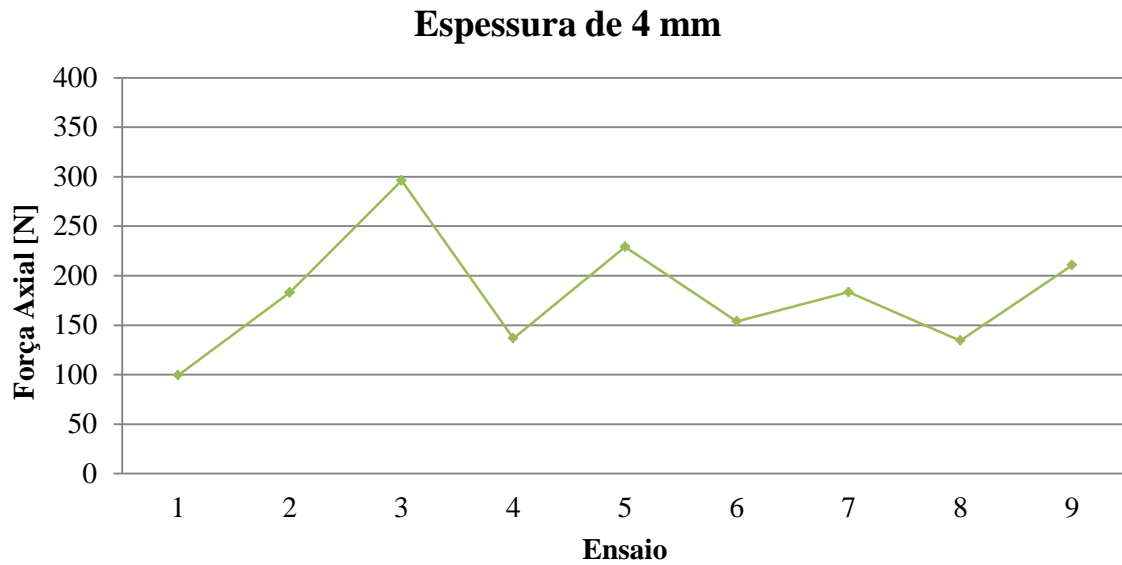


Figura 5.12 – Força Axial para cada ensaio com provete de 4 mm

Em relação ao factor de delaminação pode-se verificar que o ensaio com menor valor é o ensaio número 5. Em relação à força axial é o ensaio número 1. Pela tabela 4.1 e pela tabela 5.5 pode-se verificar que os níveis dos factores de controlo são os seguintes:

Tabela 5.6- Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para provete de 4 mm

	Ensaio	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
Factor de delaminação (min)	5	250	0.15	9
Factor de delaminação (max)	6	250	0,2	5
Força Axial (min)	1	200	0,1	5
Força Axial (max)	3	200	0,2	9

Na figura 5.13 estão representados os ensaios com maior e menor valores de factor de delaminação. Nesta figura pode-se observar-se as imagens obtidas por radiografia digital e a mesma imagem após processamento onde, a verde, se representa o diâmetro que envolve o dano.

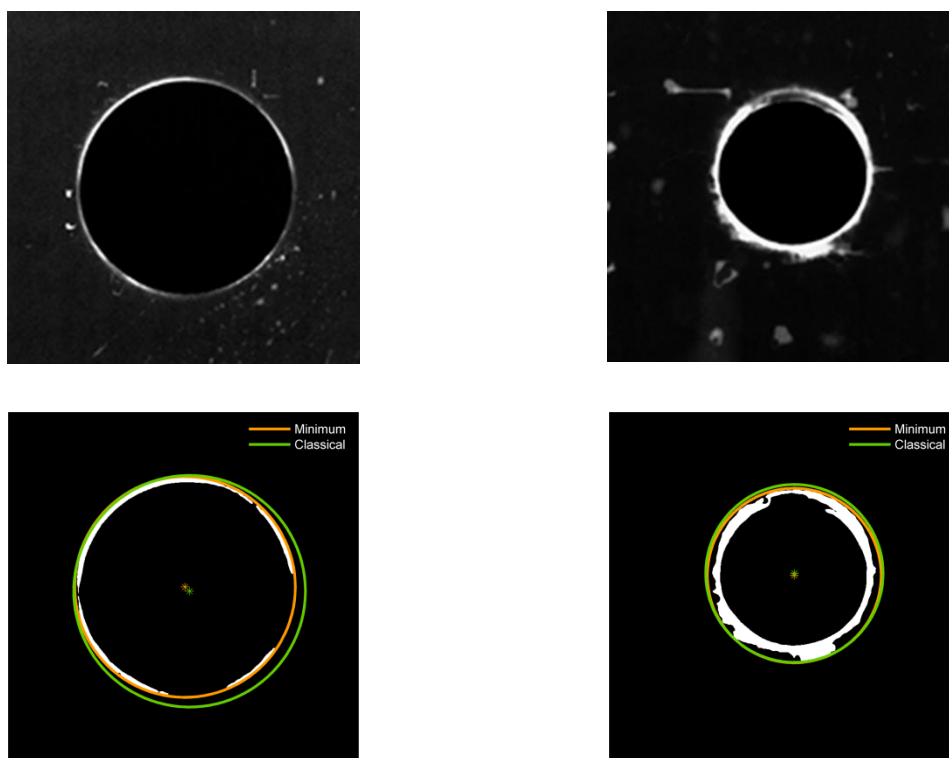
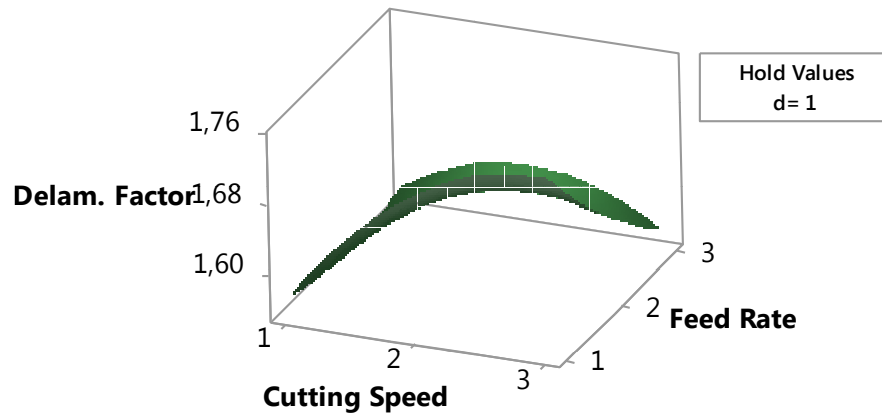


Figura 5.13 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 5); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 6)

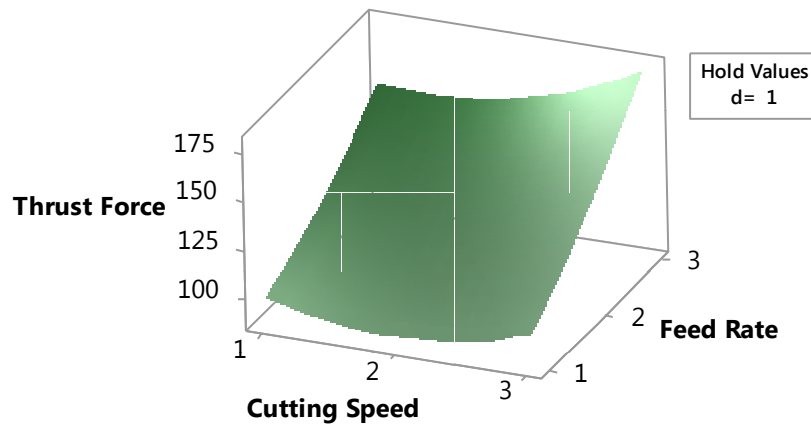
Broca de Diâmetro 5 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

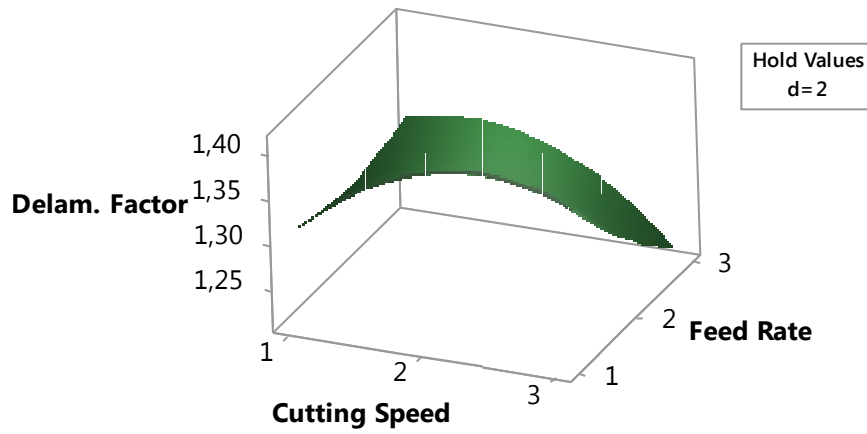


b)

Figura 5.14 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 5$ mm e $t = 4$ mm; b) força axial para $d = 5$ mm e $t = 4$ mm

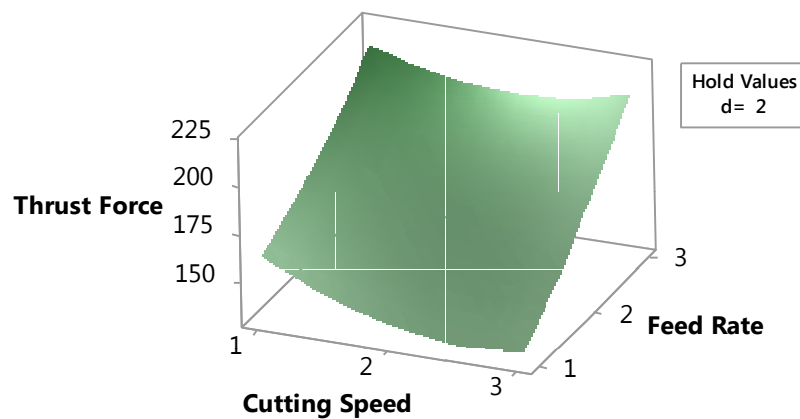
Broca de Diâmetro 7 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

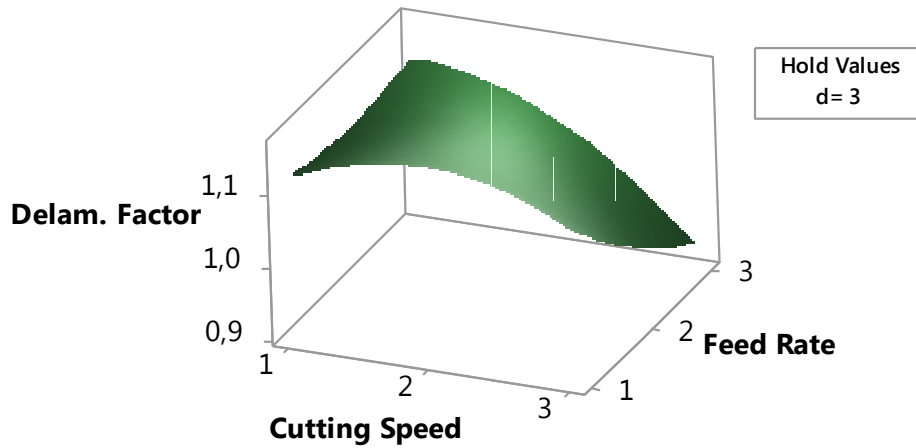


b)

Figura 5.15 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 7$ mm e $t = 4$ mm; b) força axial para $d = 7$ mm e $t = 4$ mm

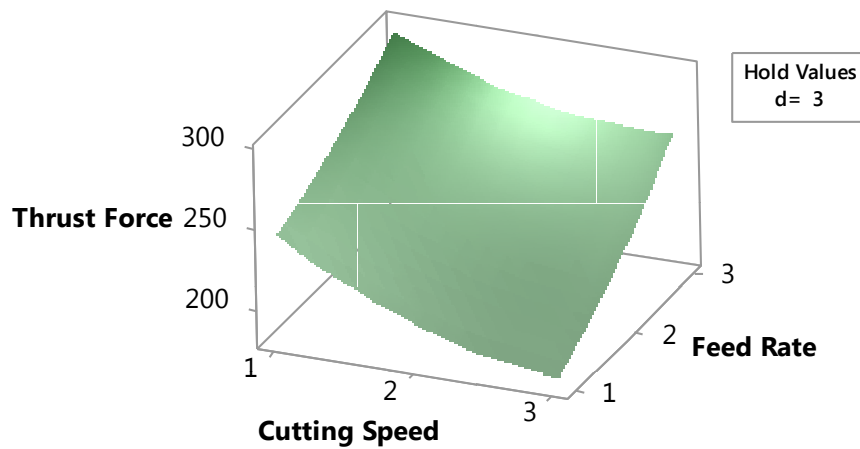
Broca de Diâmetro 9 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed



b)

Figura 5.16 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 9$ mm e $t = 4$ mm; b) força axial para $d = 9$ mm e $t = 4$ mm

Comparando os gráficos dos vários diâmetros pode-se observar que a broca que obtém menor factor de delaminação é a broca com diâmetro de 9 mm. Pode-se observar também que para níveis de velocidade de corte e avanço maiores (nível 3) obtém-se valores de factor de delaminação menores. Em relação à força axial verifica-se que para a broca de menor diâmetro (5 mm), baixos avanços (nível 1) e velocidades de corte médias (nível 2) obtém-s menor força axial.

Tabela 5.7 – Equações das regressões para provete de 4 mm do factor de delaminação e força axial.

Factor de delaminação $(\bar{R}^2=0.8649)$	$Fd = 1,622 + 0,373V - 0,009f - 0,320d - 0,0478V^2 + 0,0134f^2 + 0,0353d^2 - 0,0448V \times f - 0,0477V \times d$
Força Axial $(\bar{R}^2=0.9482)$	$F = 68,9 - 34,9V - 2,9f + 51,7d + 11,29V^2 + 5,67f^2 + 9,04d^2 + 6,29V \times f - 15,61V \times d$

A análise de resíduos foi realizada de forma análoga à da espessura de 4 mm (Figuras 5.17 e 5.18).

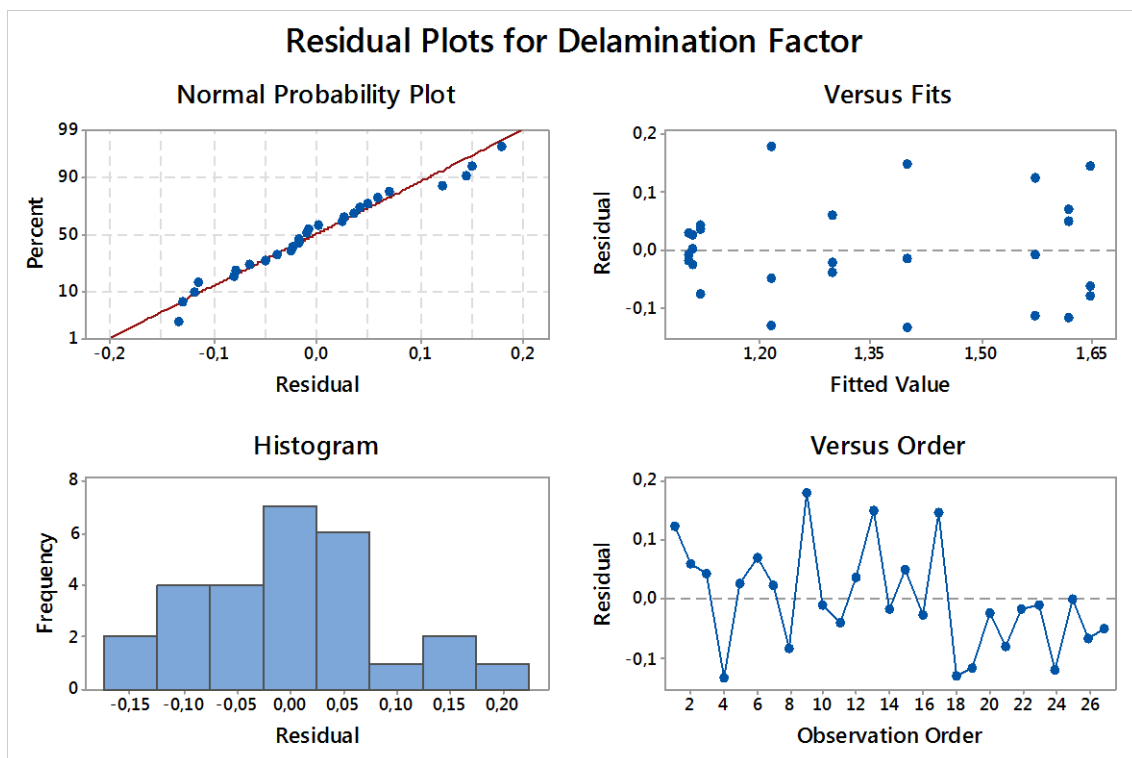


Figura 5.17- Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura 4 mm).

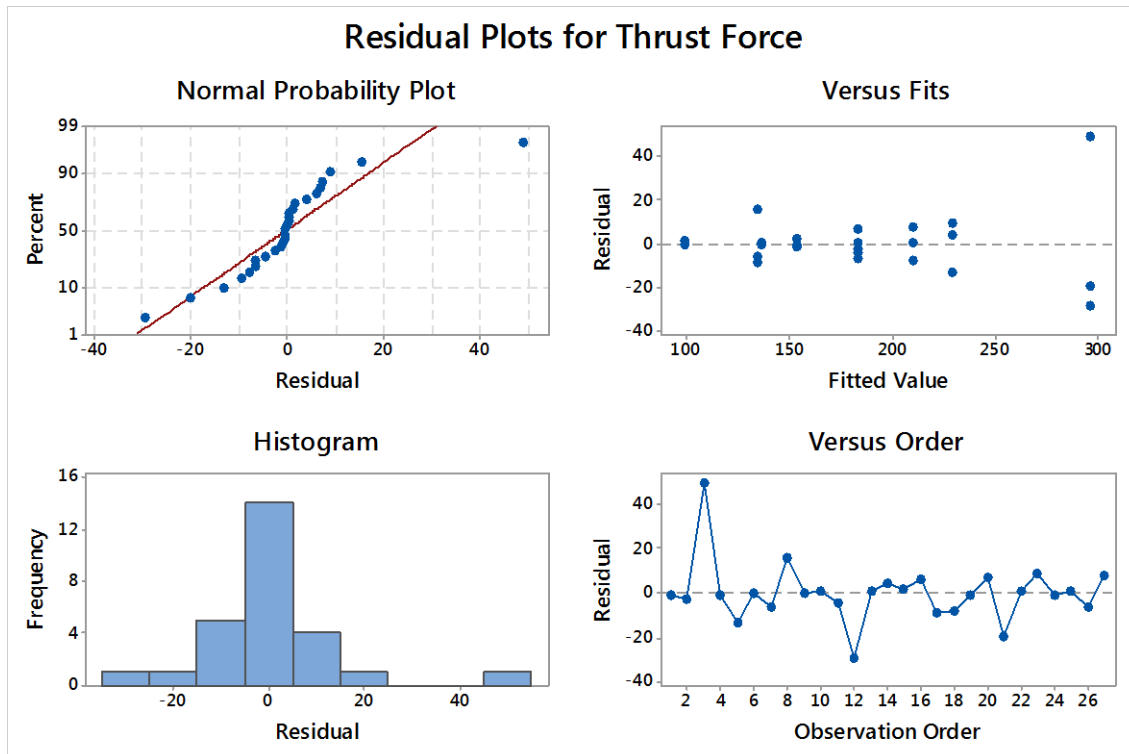


Figura 5.18 - Gráfico de resíduos para a força axial (espessura 4 mm).

À semelhança do caso anterior pode-se observar que segue uma tendência linear, uma distribuição normal e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

5.2 Factor de sinal – Espessura 6mm

De forma semelhante foram retirados dos resultados para o provete de 6 mm.

Tabela 5.8 - Planeamento de experiências para espessura de 6 mm

Exp	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
1	200	0,10	5
2	200	0,15	7
3	200	0,20	9
4	250	0,10	7
5	250	0,15	9
6	250	0,20	5
7	300	0,10	9
8	300	0,15	5
9	300	0,20	7

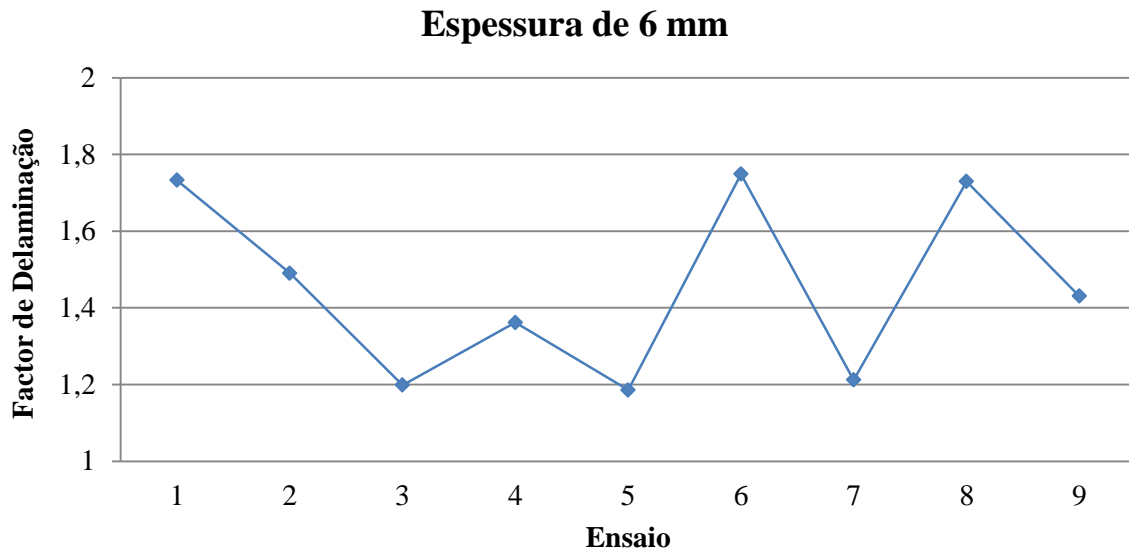


Figura 5.19 – Factor de delaminação para cada ensaio com provete de 6 mm

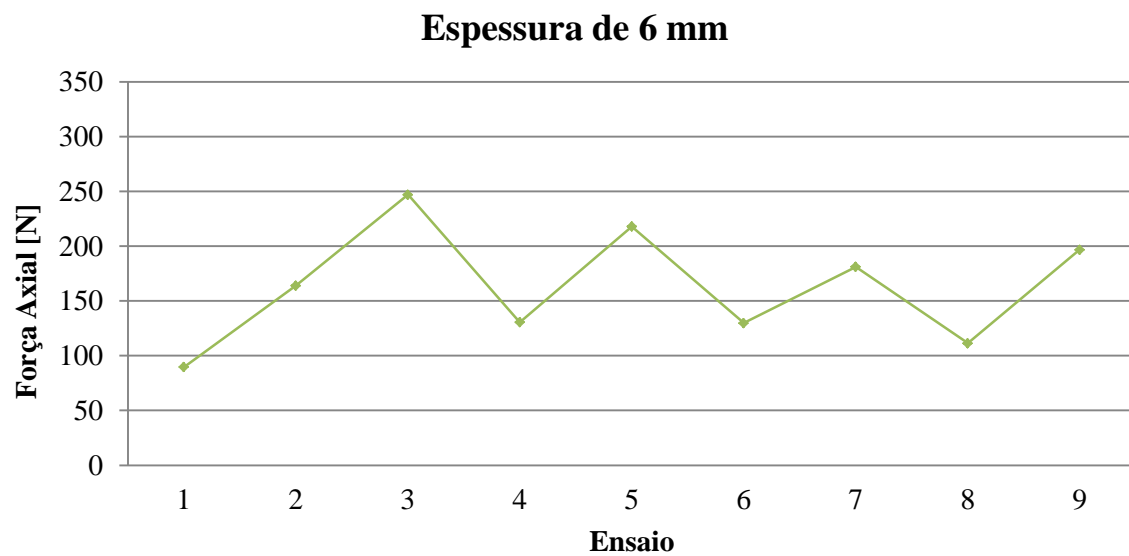


Figura 5.20 – Força Axial para cada ensaio com provete de 6 mm

Em relação ao factor de delaminação pode-se verificar que o ensaio com menor valor é o ensaio número 5. Em relação à força axial é o ensaio número 1. Pela tabela 4.1 e pela tabela 5.8 pode-se verificar que os níveis dos factores de controlo são os seguintes:

Tabela 5.9 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para provete de 6 mm

	Ensaio	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)
Factor de delaminação (min)	5	250	0.15	9
Factor de delaminação (max)	6	250	0,2	5
Força Axial (min)	1	200	0,1	5
Força Axial (max)	3	200	0,2	9

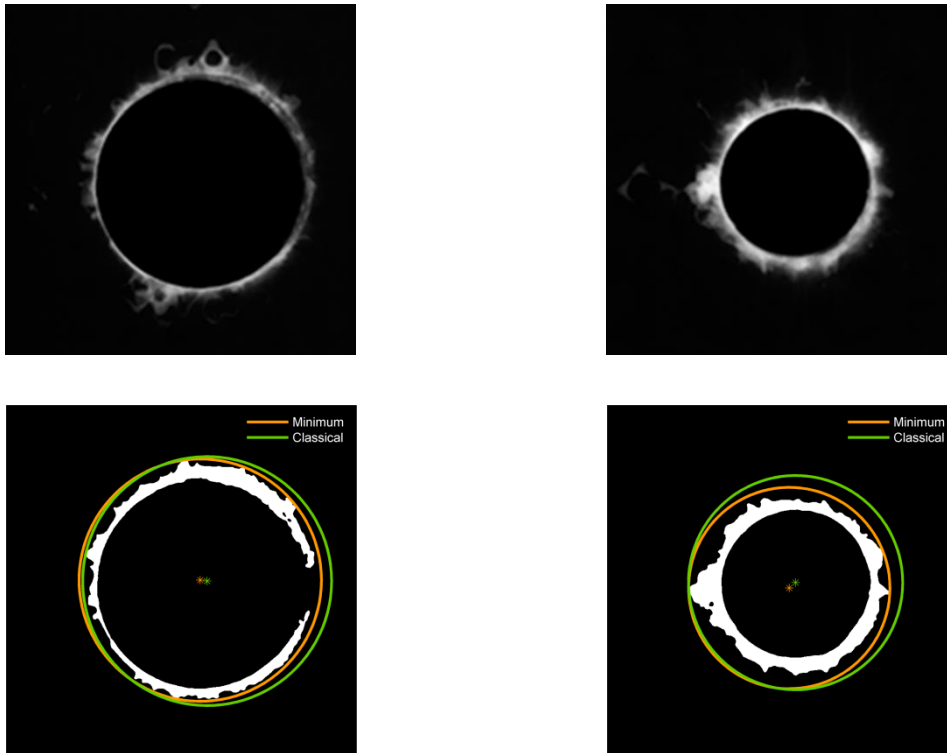
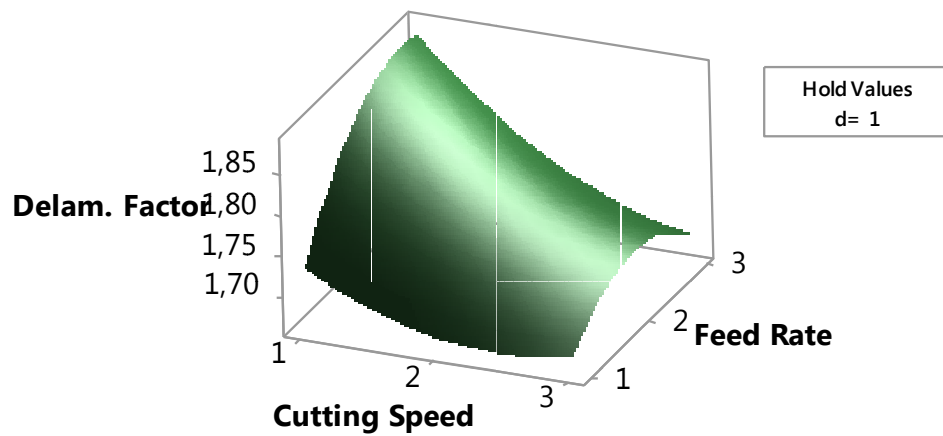


Figura 5.21 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 5); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 6)

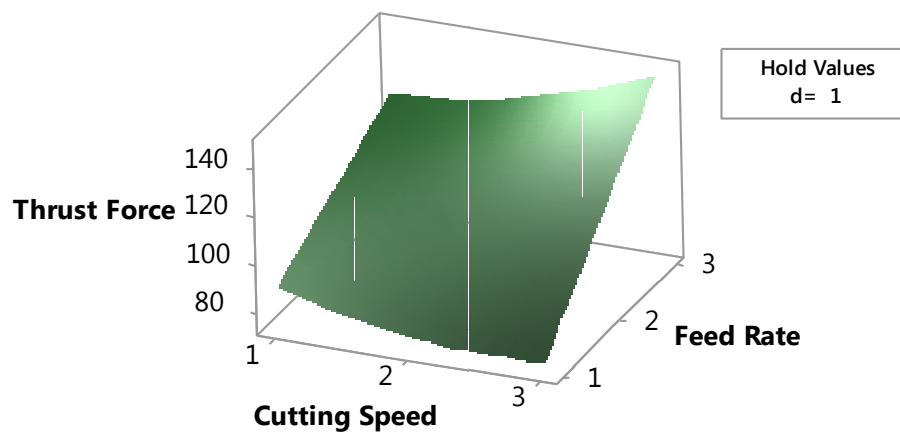
Broca de Diâmetro 5 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

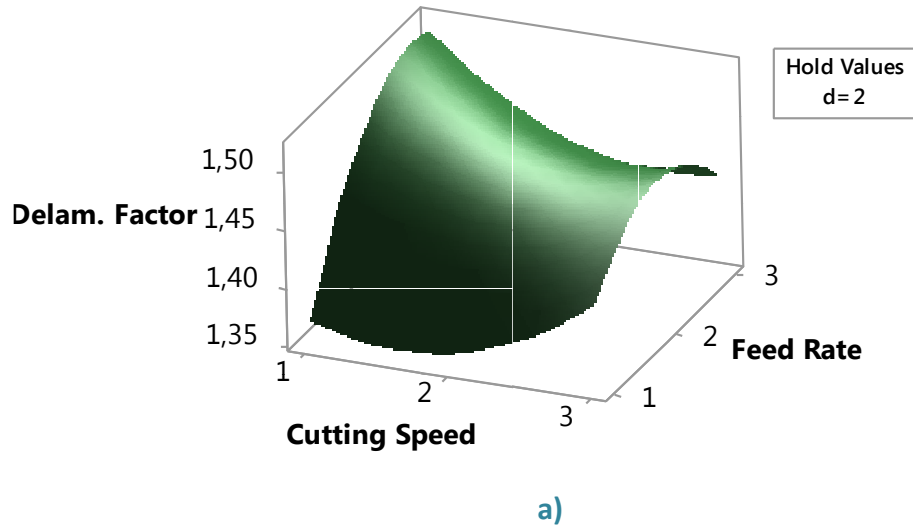


b)

Figura 5.22 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 5$ mm e $t = 6$ mm; b) força axial para $d = 5$ mm e $t = 6$ mm

Broca de Diâmetro 7 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

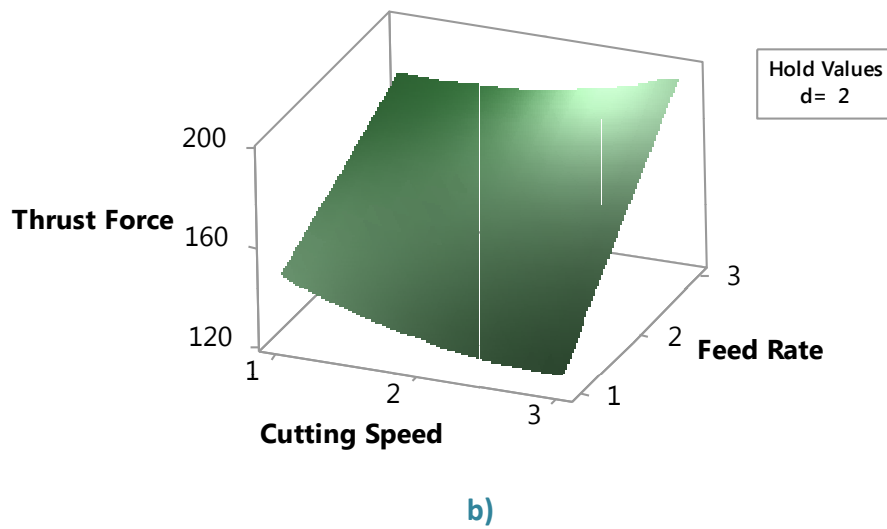
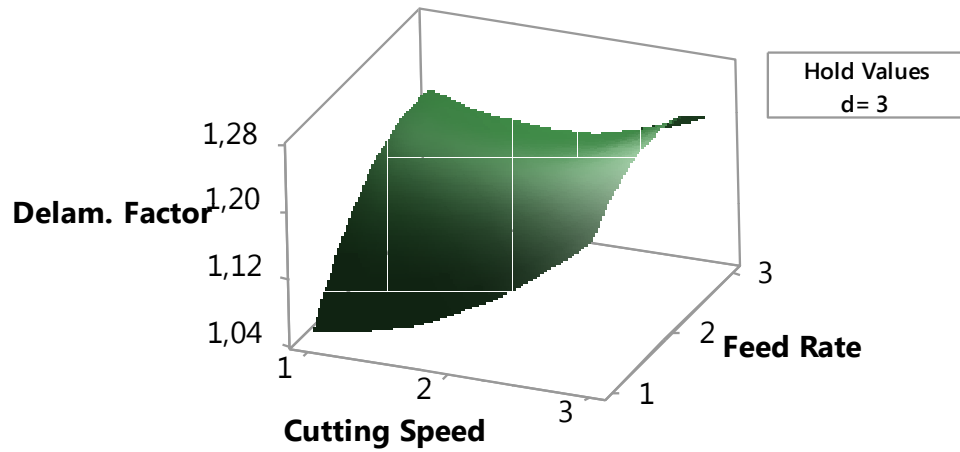


Figura 5.23 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 7$ mm e $t = 6$ mm; b) força axial para $d = 7$ mm e $t = 6$ mm

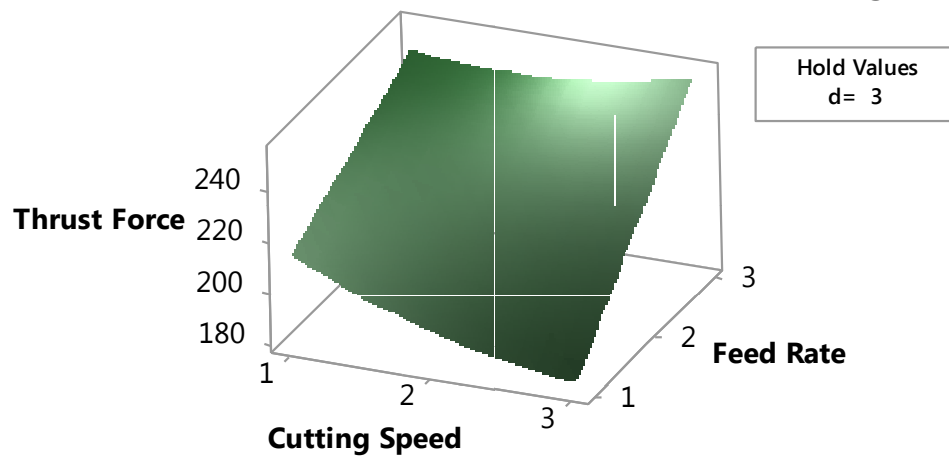
Broca de Diâmetro 9 mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed



b)

Figura 5.24 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $d = 9$ mm e $t = 6$ mm; b) força axial para $d = 9$ mm e $t = 6$ mm

Comparando os gráficos dos vários diâmetros pode-se observar que a broca que obtém menor factor de delaminação é a broca com diâmetro de 9 mm. Pode-se observar também que para níveis de velocidade de corte e avanço menores (nível 1) obtêm-se valores de factor de delaminação menores. Em relação à força axial verifica-se que para a broca de menor diâmetro (5 mm), baixos avanços (nível 1) e velocidades de corte altas (nível 3) obtém-se menor força axial.

Tabela 5.10 – Equações das regressões para provete de 6 mm do factor de delaminação e força axial

Factor de delaminação $(\bar{R}^2=0.9356)$	$Fd = 2,075 - 0,183V + 0,298f - 0,487Td + 0,0337V^2 - 0,0479f^2 + 0,0234d^2 - 0,0339V \times f + 0,0536V \times d$
Força Axial $(\bar{R}^2=0.9891)$	$F = 52,5 - 34,3V + 5,5f + 50,9d + 5,56V^2 + 0,37f^2 + 3,94d^2 + 9,73V \times f - 4,65V \times d$

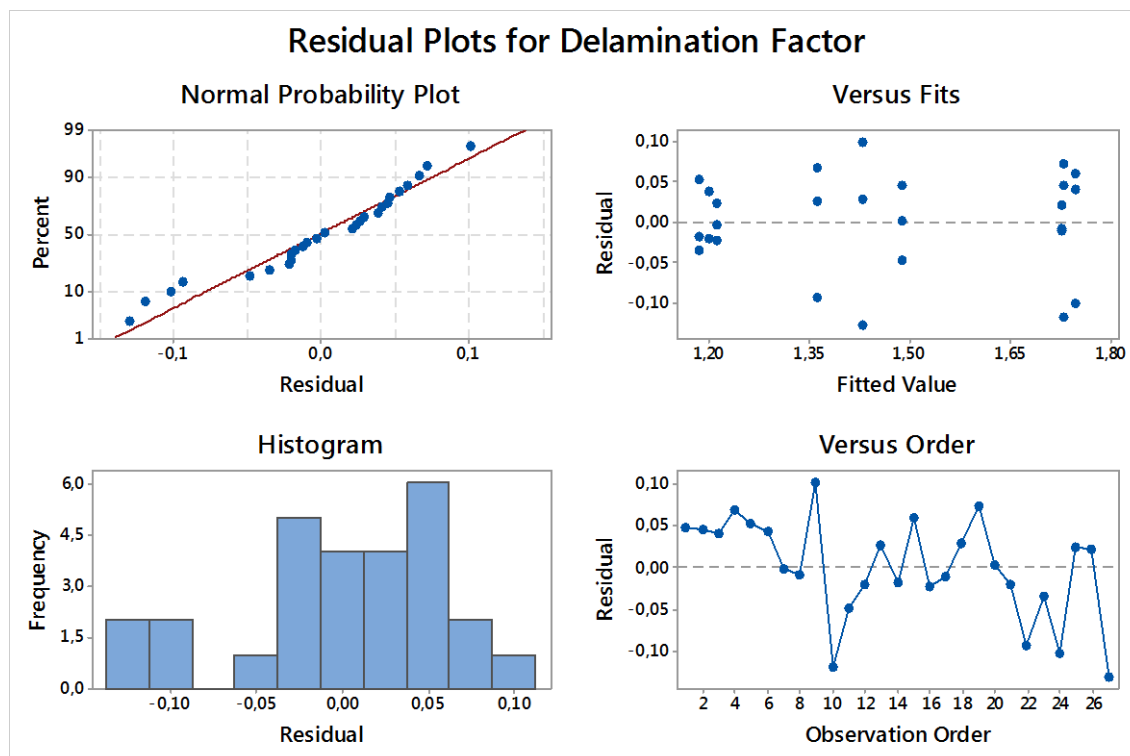


Figura 5.25 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura 6 mm).

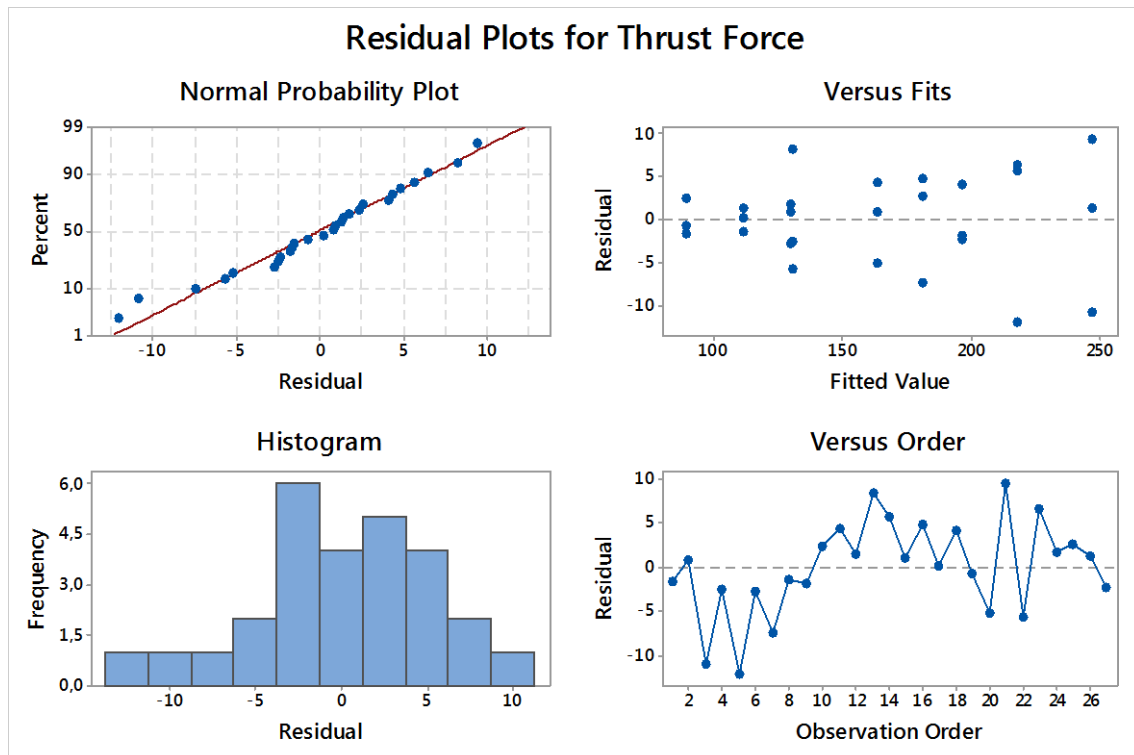


Figura 5.26 - Gráfico de resíduos para a força axial (espessura 6 mm).

À semelhança do caso anterior pode-se observar que segue uma tendência linear, uma distribuição normal no caso da força axial e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

5.3 Factor de sinal – diâmetro da broca 5mm

Neste planeamento de experiências alterou-se o factor de sinal que passou a ser o diâmetro da broca e a espessura do provete passou a ser um factor de controlo. Os resultados são calculados de forma semelhante aos resultados retirados quando o factor de sinal era a espessura do provete.

Tabela 5.11 - Planeamento de experiências para broca de 5 mm

Exp	V (m/min)	f (mm/rev)	t (mm)
1	200	0,10	2
2	200	0,15	4
3	200	0,20	6
4	250	0,10	4
5	250	0,15	6
6	250	0,20	2
7	300	0,10	6
8	300	0,15	2
9	300	0,20	4

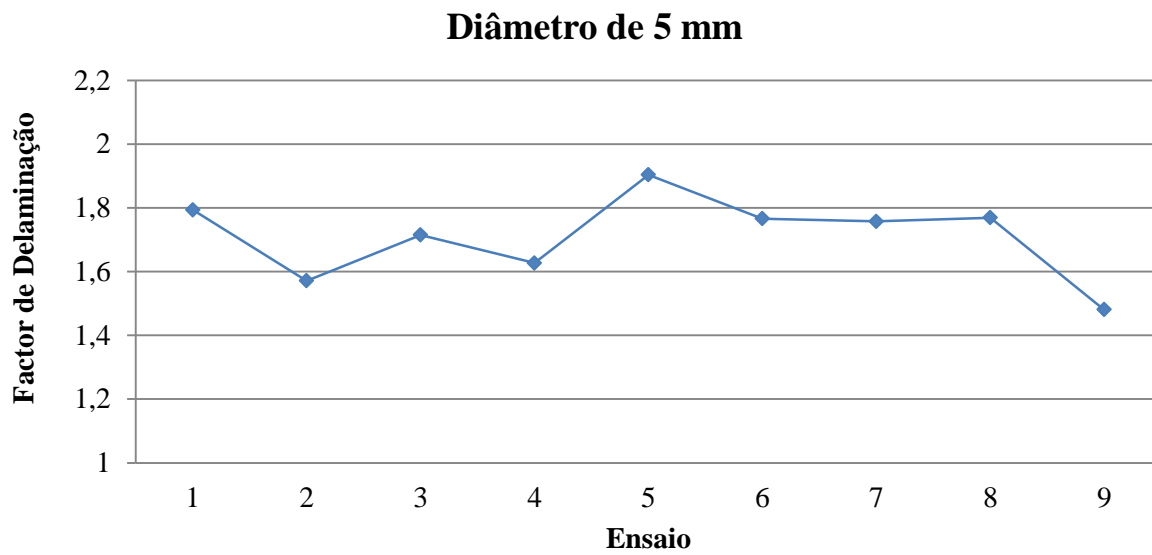


Figura 5.27 – Factor de delaminação para cada ensaio com broca de 5 mm

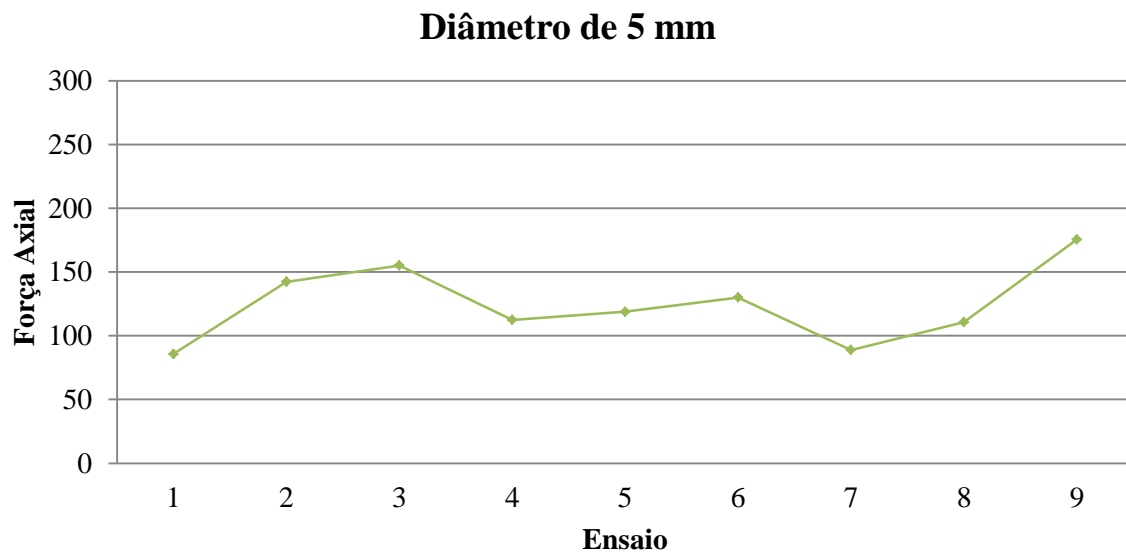


Figura 5.28 – Força Axial para cada ensaio com broca de 6 mm

Em relação ao factor de delaminação pode-se verificar que o ensaio com menor valor é o ensaio número 9. Em relação à força axial é o ensaio número 1. Pela tabela 4.1 e pela tabela 5.11 pode-se verificar que os níveis dos factores de controlo são os seguintes:

Tabela 5.12 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para broca de 5 mm.

	Ensaio	V (m/min)	f (mm/rev)	t(mm)
Factor de delaminação (min)	9	300	0.2	4
Factor de delaminação (max)	5	250	0,15	6
Força Axial (min)	1	200	0,1	2
Força Axial (max)	9	300	0.2	4

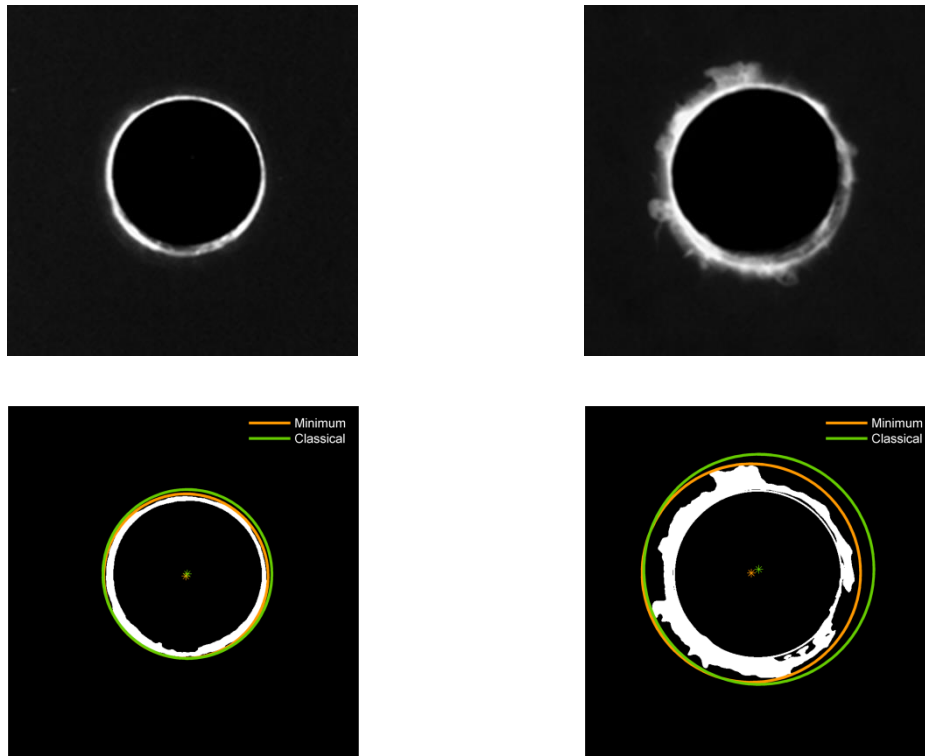
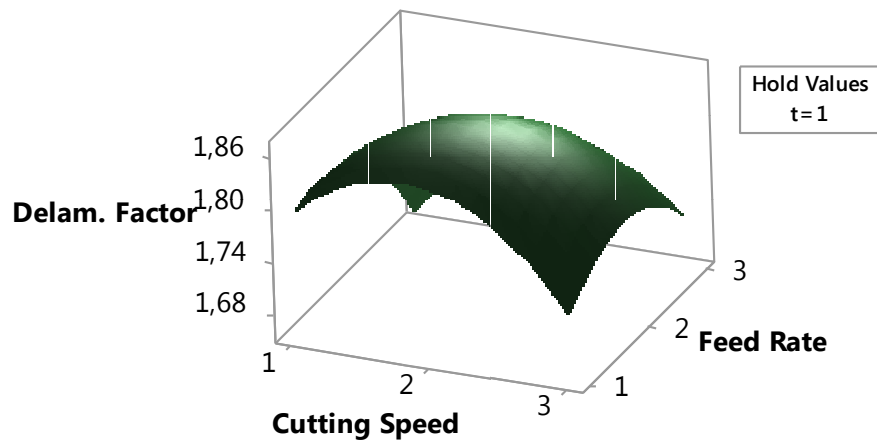


Figura 5.29 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 9); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 5)

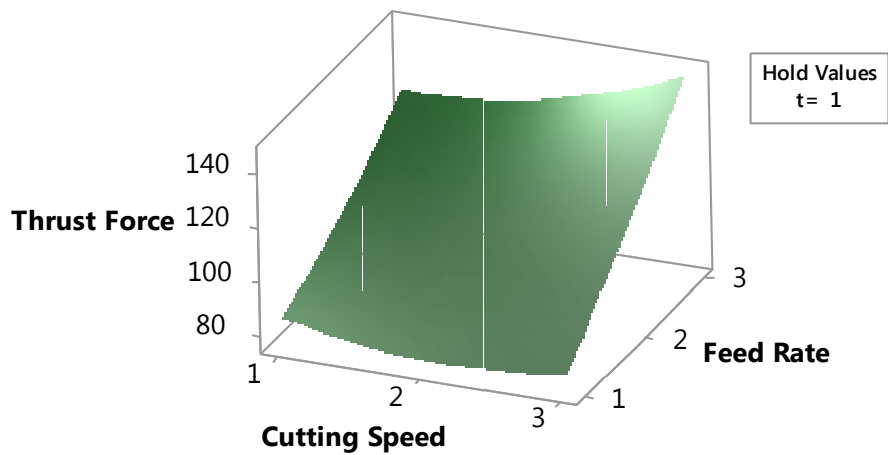
Espessura 2mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

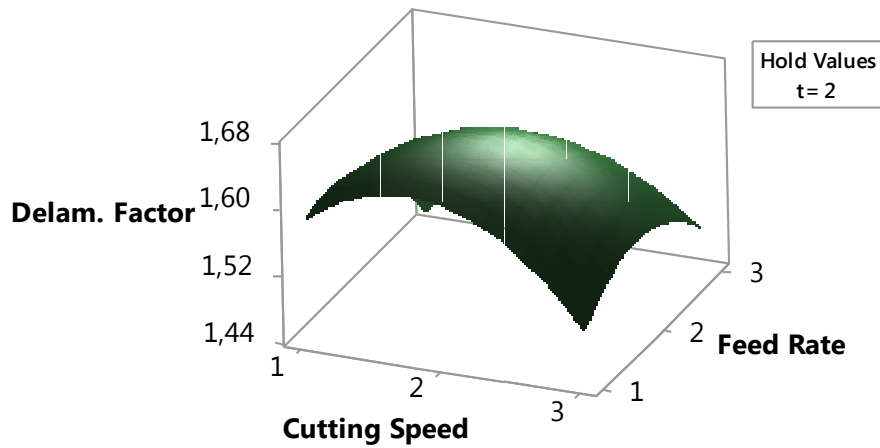


b)

Figura 5.30 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 2$ mm e $d = 5$ mm; b) força axial para $t = 2$ mm e $d = 5$ mm

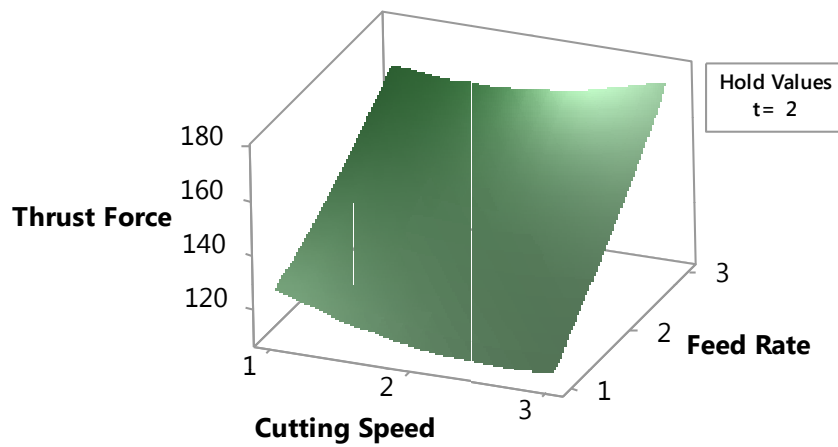
Espessura 4mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

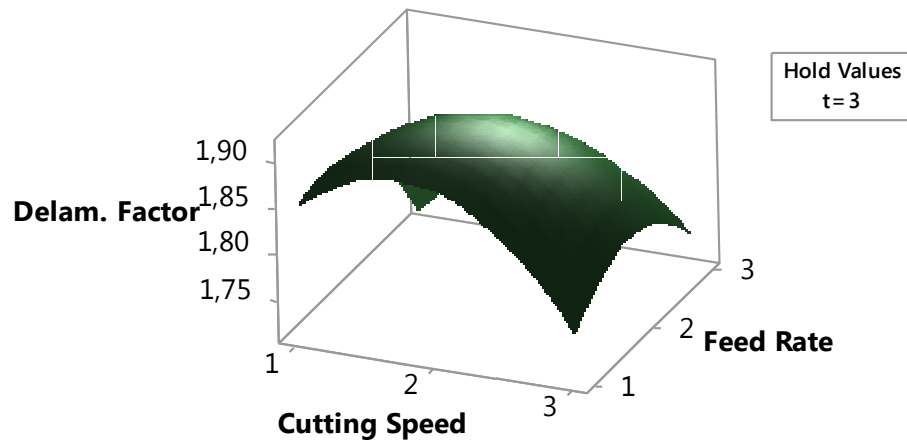


b)

Figura 5.31 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 4$ mm e $d = 5$ mm; b) força axial para $t = 4$ mm e $d = 5$ mm

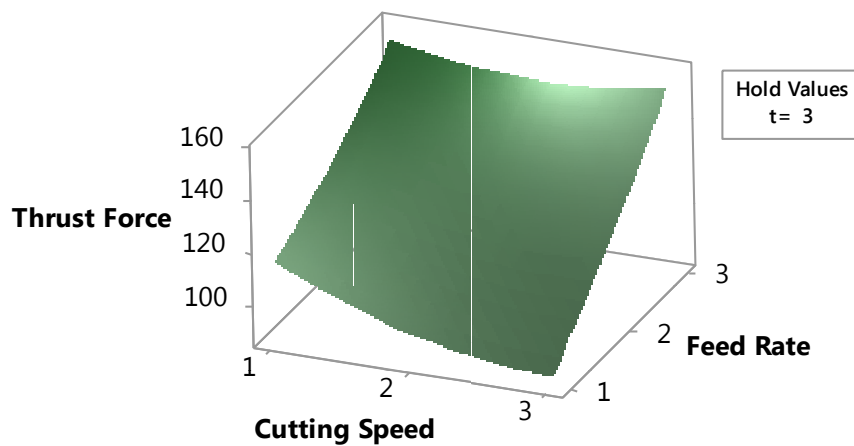
Espessura 6mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed



b)

Figura 5.32 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 6$ mm e $d = 5$ mm; b) força axial para $t = 6$ mm e $d = 5$ mm

Comparando os gráficos das várias espessuras pode-se observar que a espessura que obtém menor factor de delaminação é a espessura de 4 mm. Pode-se observar também que para níveis de velocidade de corte e avanço maiores (nível 3) ou para níveis de velocidade de corte baixas (nível 1) e avanço altas (nível 3) obtêm-se valores de factor de delaminação menores. Em relação à força axial verifica-se que para a menor espessura (2 mm), baixos avanços (nível 1) e velocidades de corte médias, altas (nível 2, 3) obtêm-se menor força axial.

Tabela 5.13– Equações das regressões para broca de 5 mm do factor de delaminação e força axial.

Factor de delaminação ($\bar{R}^2=0.3202$)	$Fd = 2,186 + 0,280V + 0,127f - 0,920t - 0,0842V^2$ $- 0,055f^2 + 0,238t^2 + 0,028V \times f - 0,006V \times t$
Força Axial ($\bar{R}^2=0.9558$)	$F = 5,5 - 26,1V - 0,5f + 122,2t + 5,89V^2 + 3,51f^2$ $- 25,38t^2 + 6,30V \times f - 5,71V \times t$

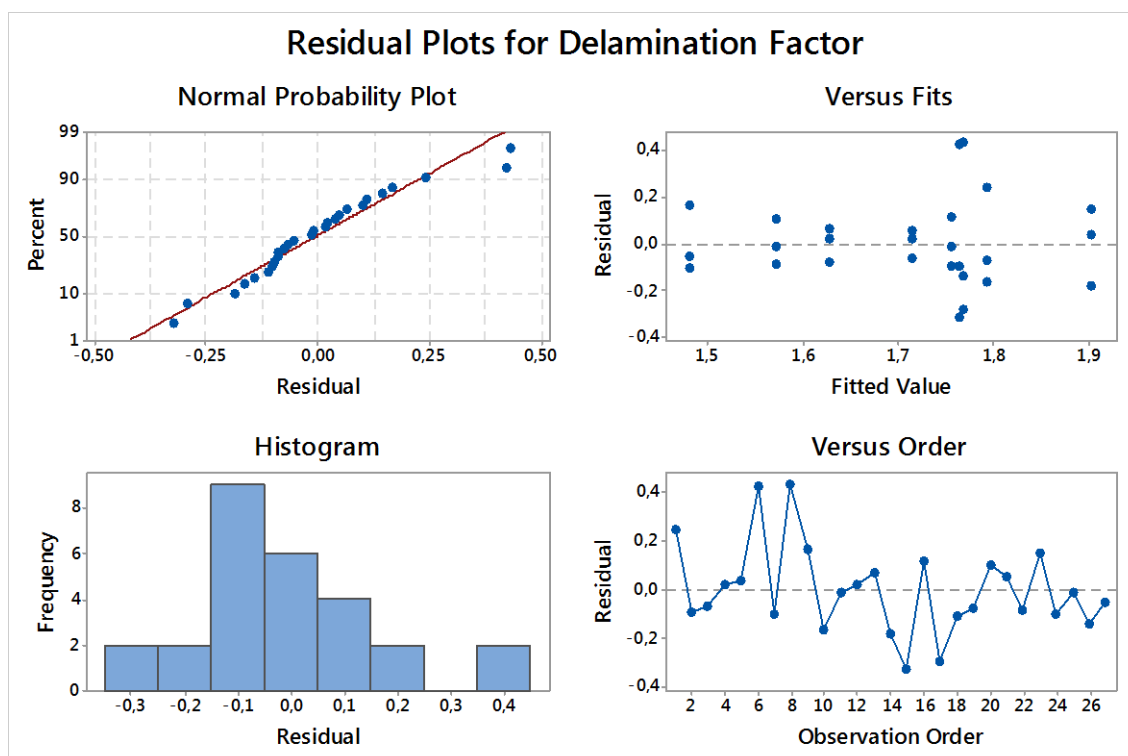


Figura 5.33- Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (Broca de 5 mm).

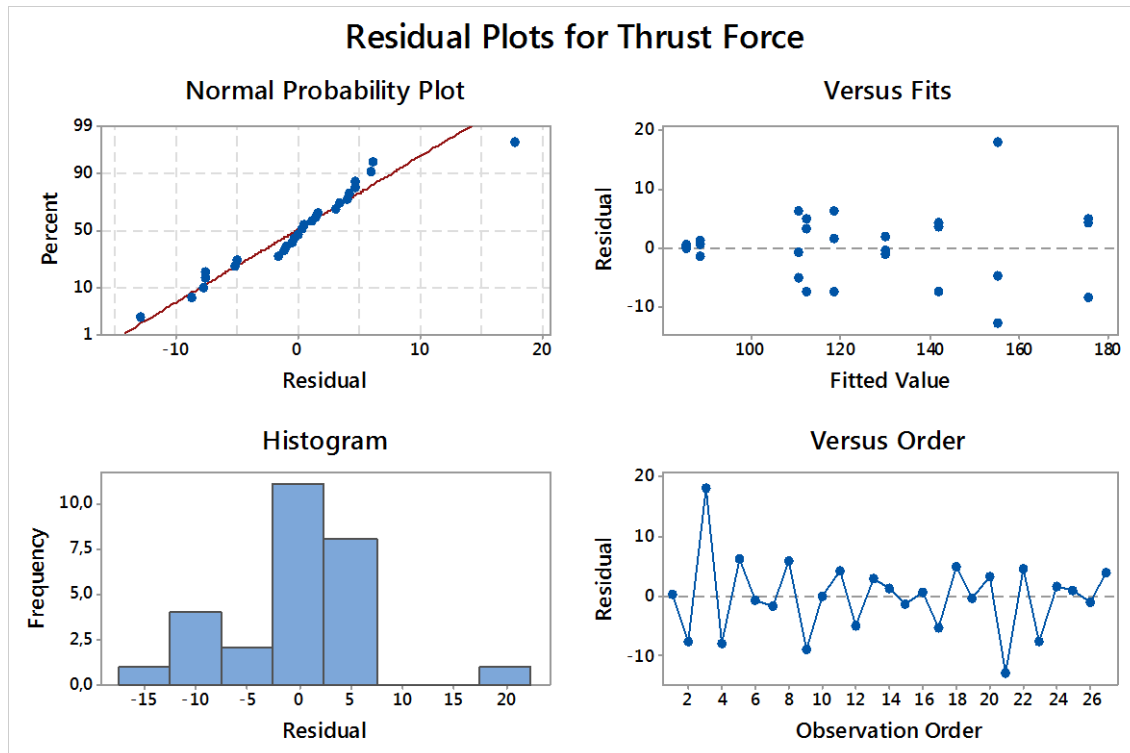


Figura 5.34 - Gráfico de resíduos para a força axial (Broca de 5 mm).

À semelhança do caso anterior pode-se observar que segue uma tendência linear, uma distribuição aproximada à normal e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

5.4 Factor de sinal – Broca de diâmetro 7mm

De forma semelhante foram retirados dos resultados para a broca de diâmetro 7mm.

Tabela 5.14 - Planeamento de experiências para broca de 7 mm

Exp	V (m/min)	f (mm/rev)	t (mm)
1	200	0,10	2
2	200	0,15	4
3	200	0,20	6
4	250	0,10	4
5	250	0,15	6
6	250	0,20	2
7	300	0,10	6
8	300	0,15	2
9	300	0,20	4

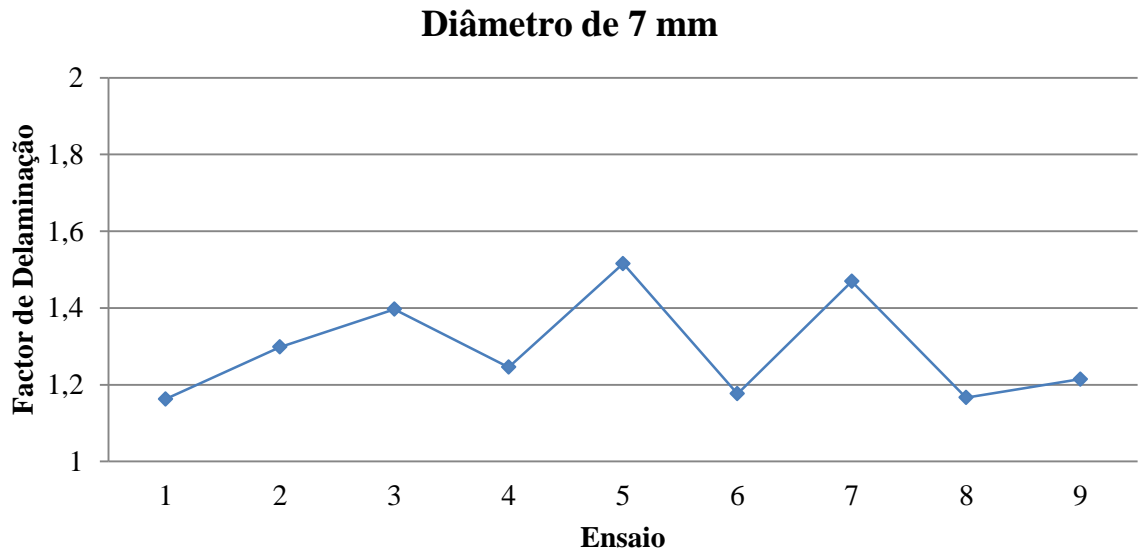


Figura 5.35 – Factor de delaminação para cada ensaio com broca de 7 mm

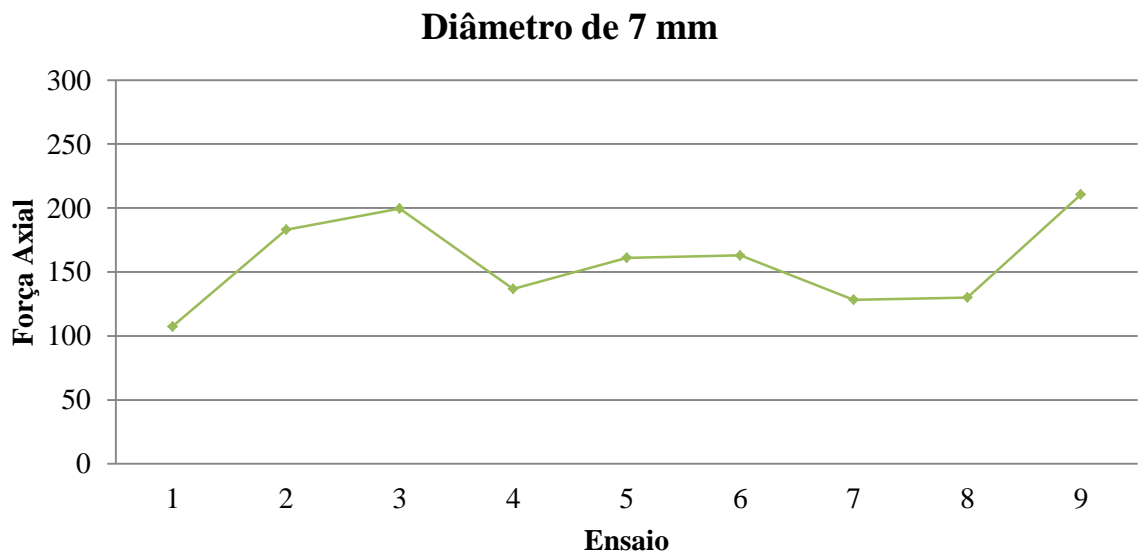


Figura 5.36 – Força axial para cada ensaio com broca de 7 mm

Em relação ao factor de delaminação pode-se verificar que o ensaio com menor valor é o ensaio número 9. Em relação à força axial é o ensaio número 1. Pela tabela 4.1 e pela tabela 5.14 pode-se verificar que os níveis dos factores de controlo são os seguintes:

Tabela 5.15 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para broca de 7 mm.

	Ensaio	V (m/min)	f (mm/rev)	t(mm)
Factor de delaminação (min)	1	200	0,1	2
Factor de delaminação (max)	5	250	0,15	6
Força Axial (min)	1	200	0,1	2
Força Axial (max)	9	300	0.2	4

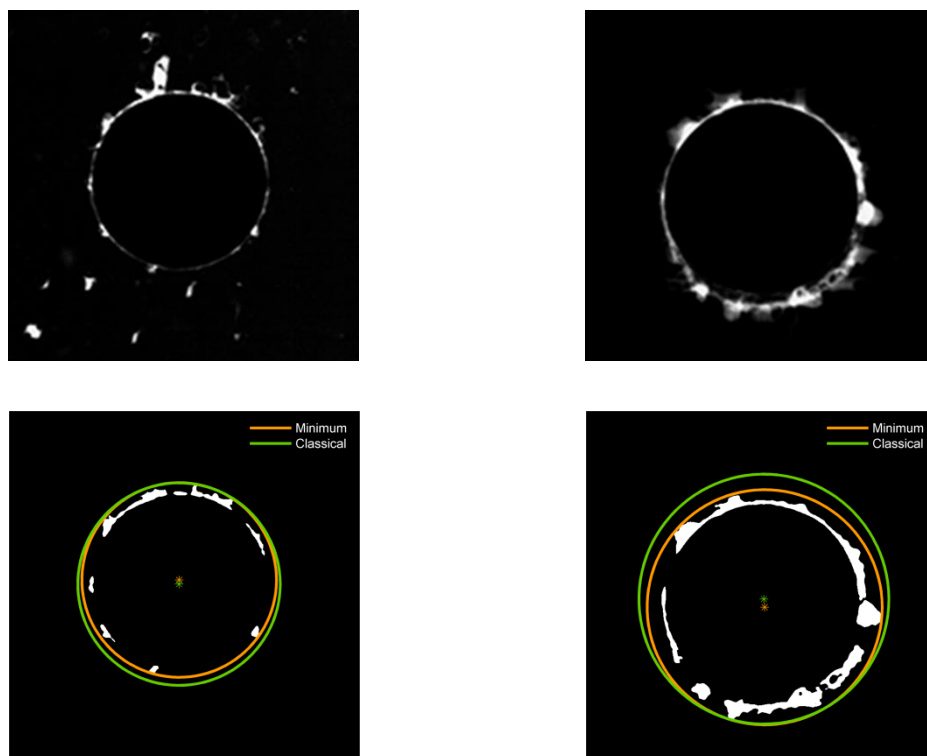
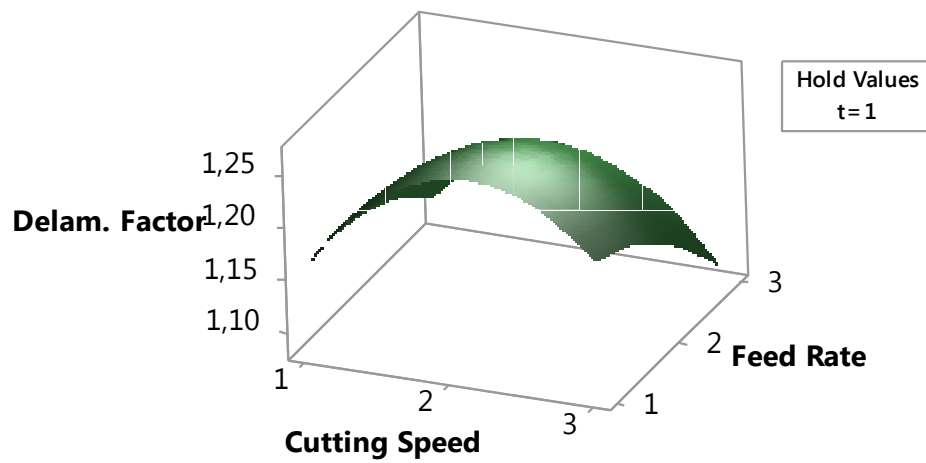


Figura 5.37 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 1); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 5)

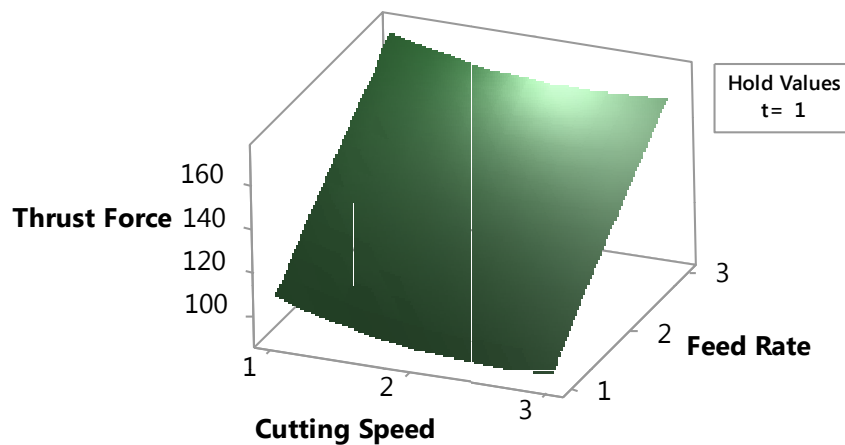
Espessura 2mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

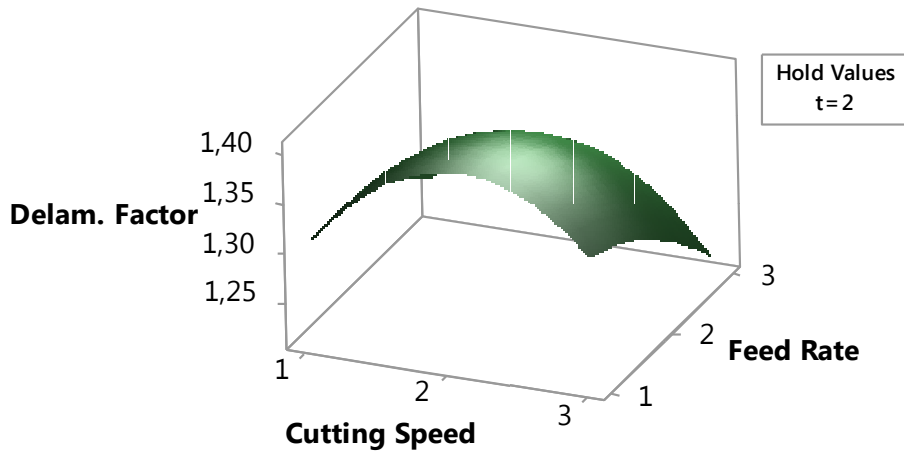


b)

Figura 5.38 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 2$ mm e $d = 7$ mm; b) força axial para $t = 2$ mm e $d = 7$ mm

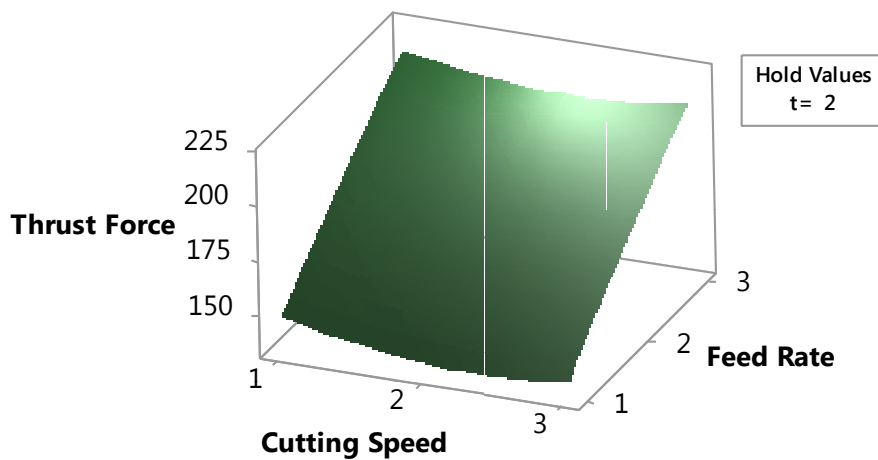
Espessura 4mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed

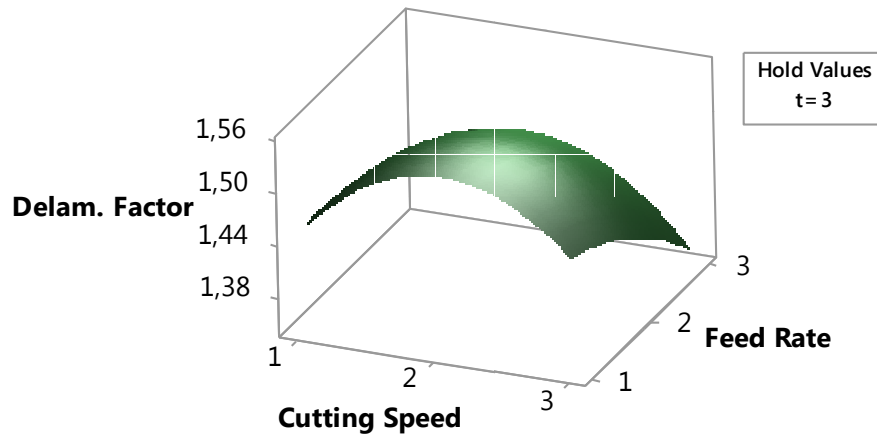


b)

Figura 5.39 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 4$ mm e $d = 7$ mm; b) força axial para $t = 4$ mm e $d = 7$ mm

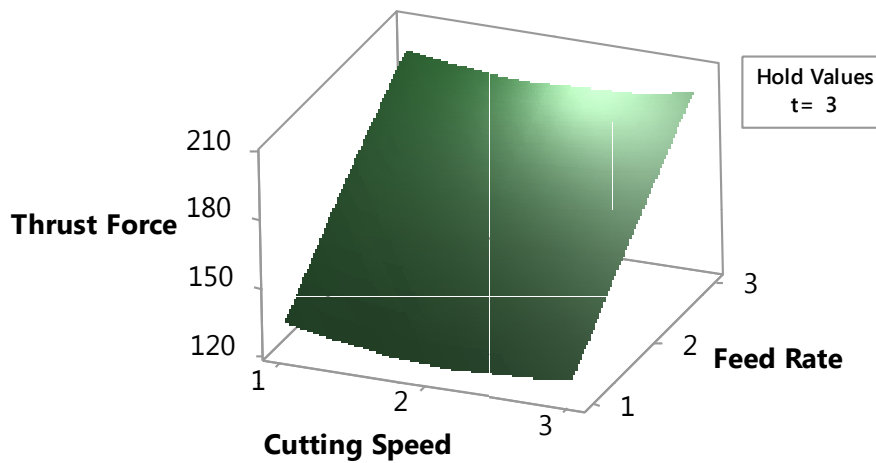
Espessura 6mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Feed Rate; Cutting Speed



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Feed Rate; Cutting Speed



b)

Figura 5.40 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 6$ mm e $d = 7$ mm; b) força axial para $t = 6$ mm e $d = 7$ mm

Comparando os gráficos das várias espessuras pode-se observar que a espessura que obtém menor factor de delaminação é a espessura de 2 mm. Pode-se observar também que para níveis de velocidade de corte e avanço maiores (nível 3) obtém-se valores de factor de delaminação menores. Em relação à força axial verifica-se que para a menor espessura (2 mm), baixos avanços (nível 1) e velocidades de corte altas (nível 3) obtém-se menor força axial.

Tabela 5.16 – Equações das regressões para broca de 7 mm do factor de delaminação e força axial.

Factor de delaminação ($\bar{R}^2=0.7726$)	$Fd = 0,703 + 0,366V + 0,070f + 0,146t - 0,0798V^2 - 0,0199f^2 + 0,0012t^2 - 0,0172V \times f - 0,0067V \times t$
Força Axial ($\bar{R}^2=0.9700$)	$F = 3,6 - 37,2V + 38,5f + 121,5t + 6,30V^2 - 1,72f^2 - 27,81t^2 + 1,60V \times f + 2,64V \times t$

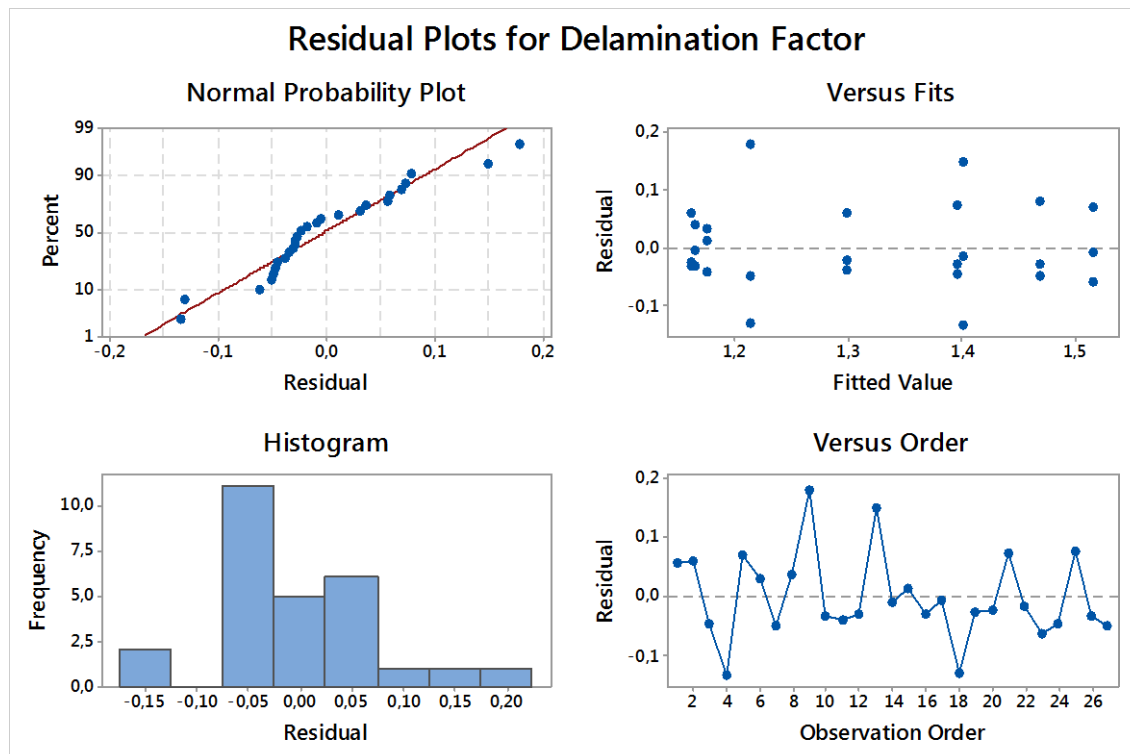


Figura 5.41 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (Broca de 7 mm).

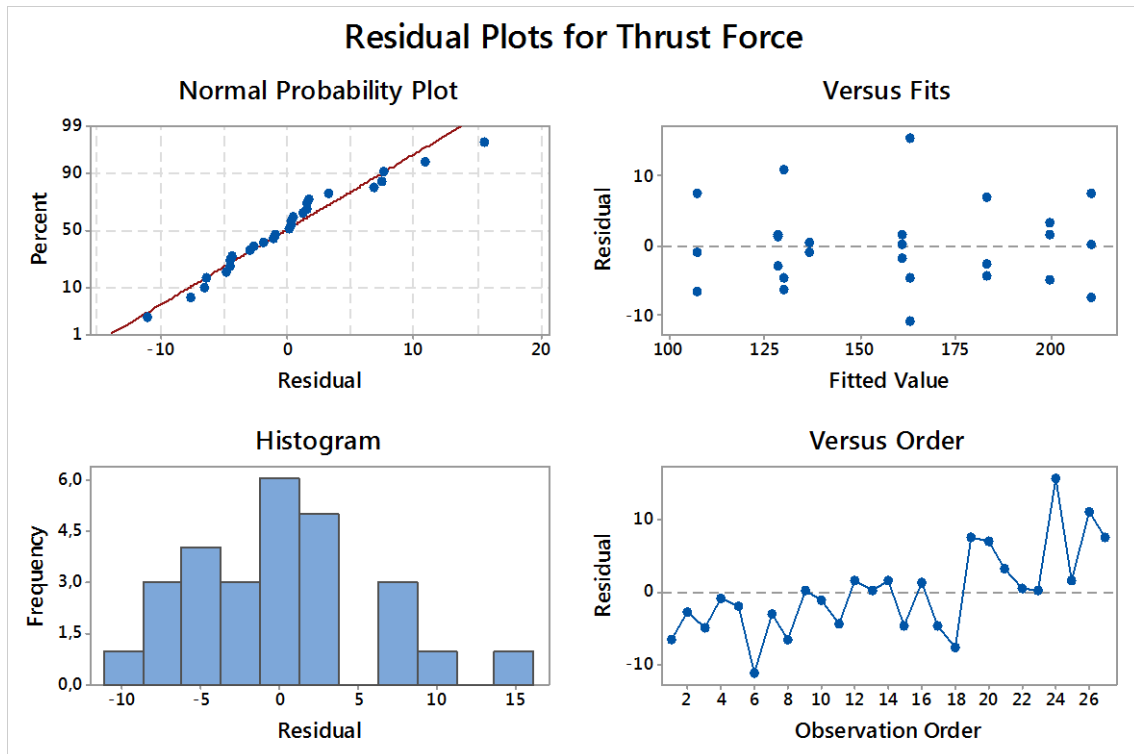


Figura 5.42 - Gráfico de resíduos para a força axial (Broca de 7 mm).

À semelhança do caso anterior pode-se observar que segue uma tendência linear, uma distribuição aproximada à normal no caso da força axial e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

5.5 Factor de sinal – Broca de diâmetro 9mm

De forma semelhante foram retirados dos resultados para a broca de diâmetro 9 mm.

Tabela 5.17- Planeamento de experiências para broca de 9 mm

Exp	V (m/min)	f (mm/rev)	t (mm)
1	200	0,10	2
2	200	0,15	4
3	200	0,20	6
4	250	0,10	4
5	250	0,15	6
6	250	0,20	2
7	300	0,10	6
8	300	0,15	2
9	300	0,20	4

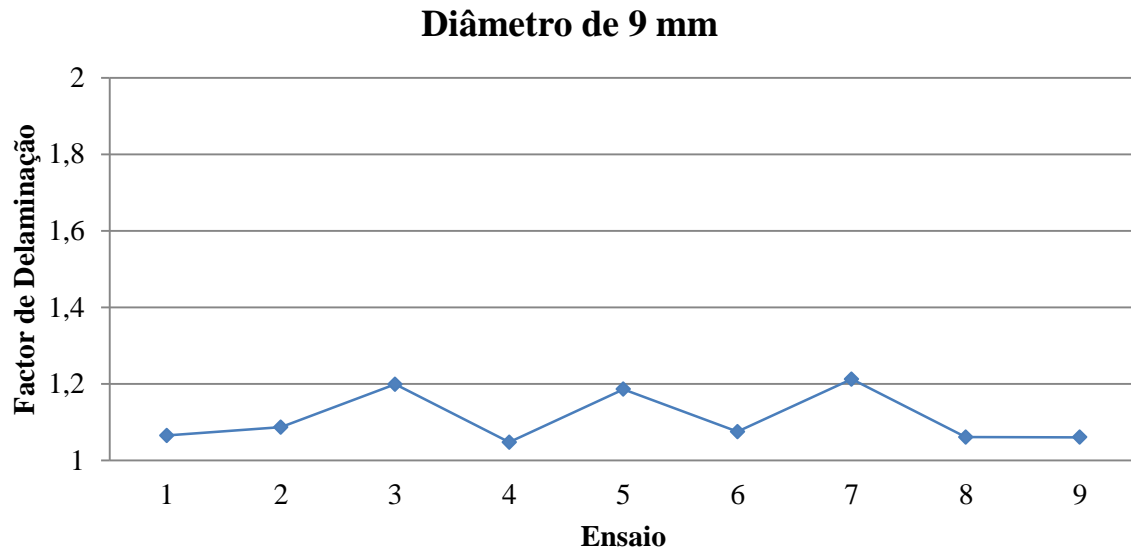


Figura 5.43 – Factor de delaminação para cada ensaio com broca de 9 mm

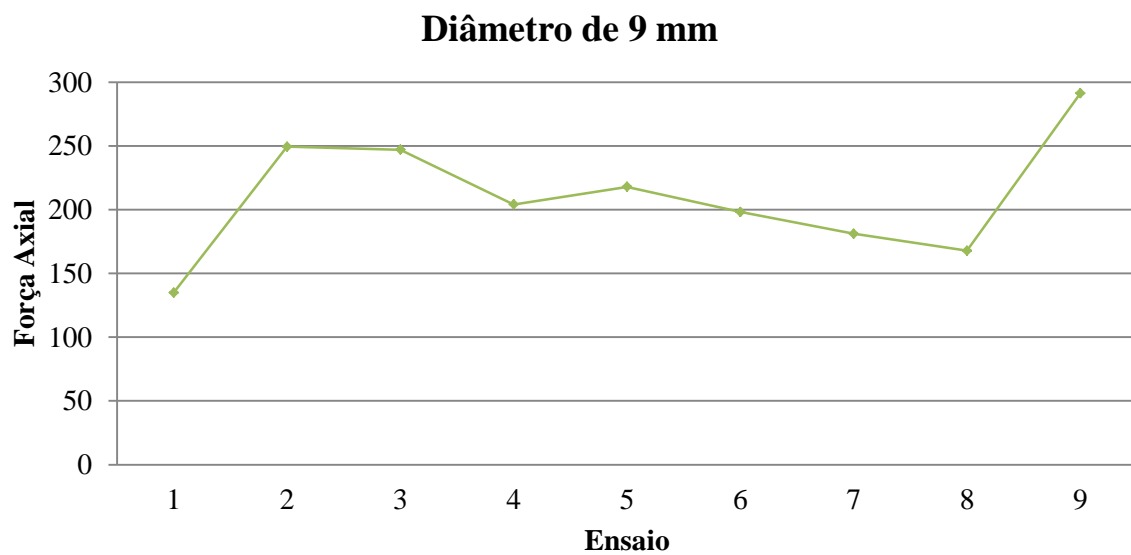


Figura 5.44 – Força axial para cada ensaio com broca de 9 mm

Em relação ao factor de delaminação pode-se verificar que o ensaio com menor valor é o ensaio número 2. Em relação à força axial é o ensaio número 1. Pela tabela 4.1 e pela tabela 5.17 pode-se verificar que os níveis dos factores de controlo são os seguintes:

Tabela 5.18 - Ensaio com valor menor e maior de delaminação e força axial para broca de 7 mm.

	Ensaio	V (m/min)	f (mm/rev)	t(mm)
Factor de delaminação (min)	4	250	0,1	4
Factor de delaminação (max)	7	300	0,1	6
Força Axial (min)	1	200	0,1	2
Força Axial (max)	9	300	0.2	4

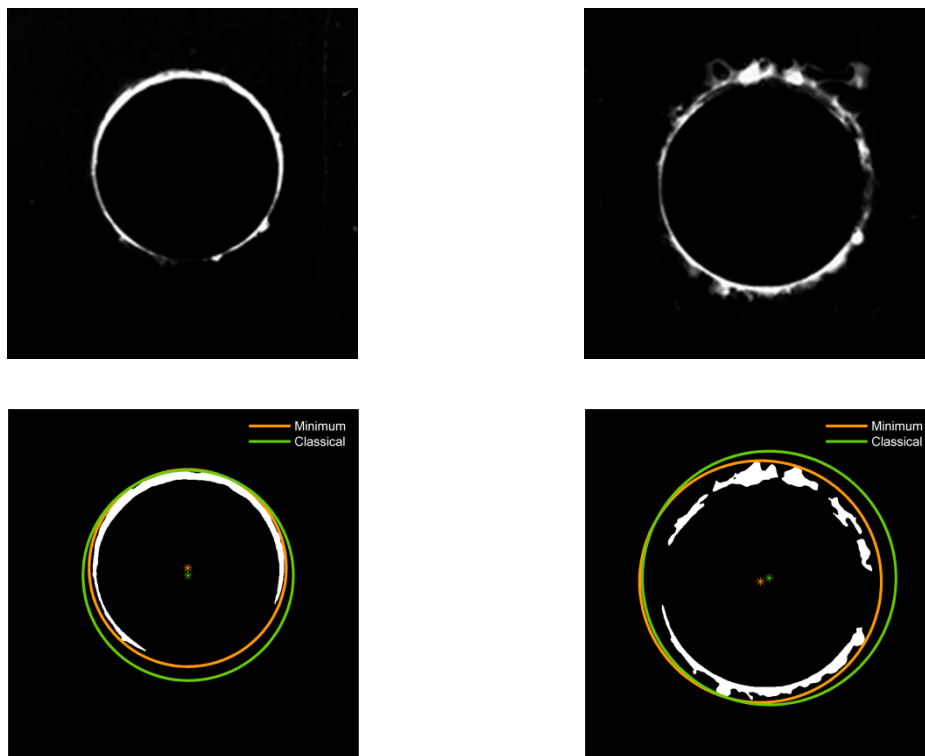
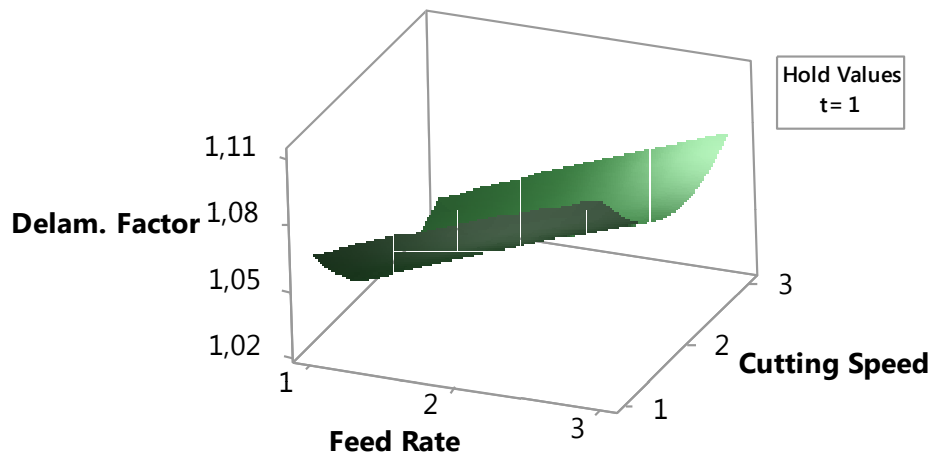


Figura 5.45 – Ensaio com menor dano (à esquerda, Ensaio 4); Ensaio com maior dano (à direita, Ensaio 7)

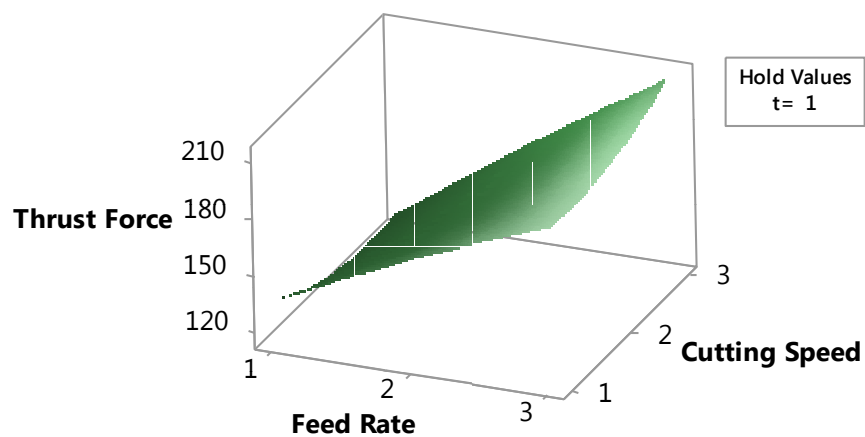
Espessura 2mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Cutting Speed; Feed Rate



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Cutting Speed; Feed Rate

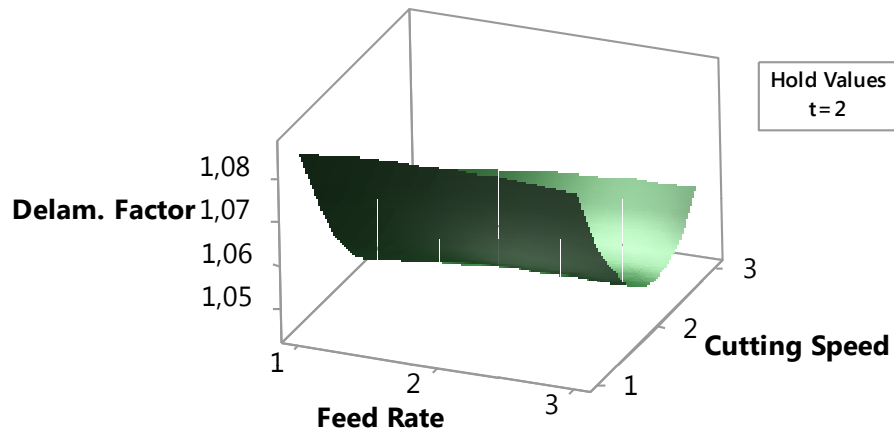


b)

Figura 5.46 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 2$ mm e $d = 9$ mm; b) força axial para $t = 2$ mm e $d = 9$ mm

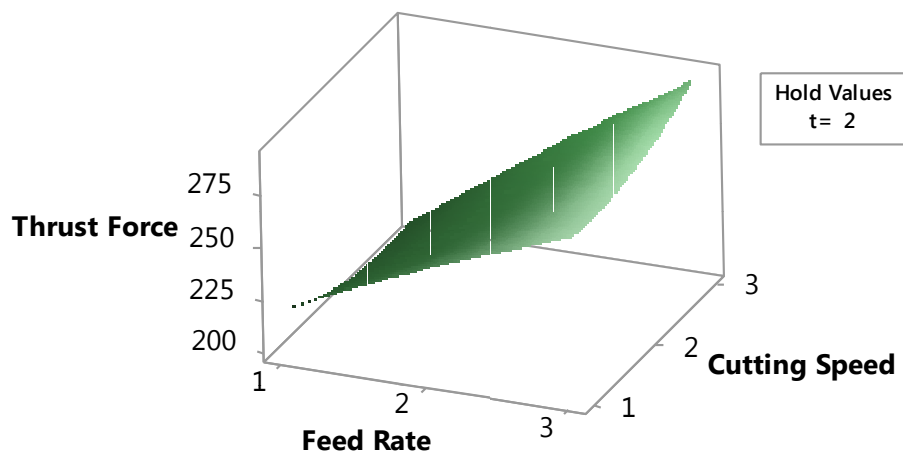
Espessura 4mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Cutting Speed; Feed Rate



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Cutting Speed; Feed Rate

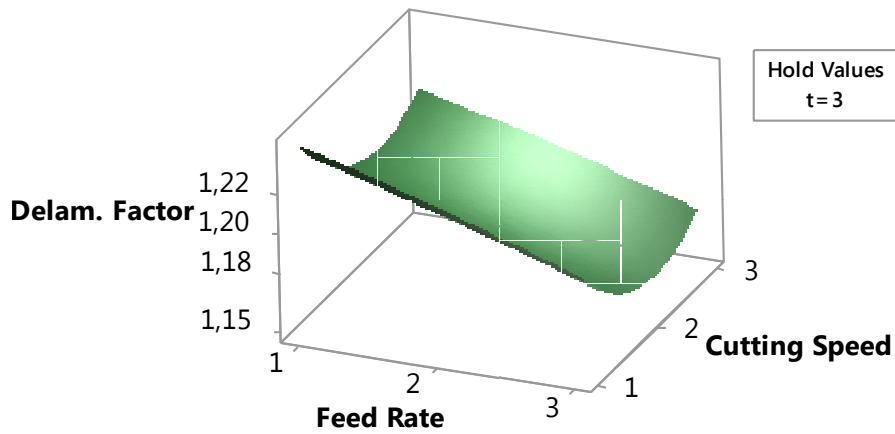


b)

Figura 5.47 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 4$ mm e $d = 9$ mm; b) força axial para $t = 4$ mm e $d = 9$ mm

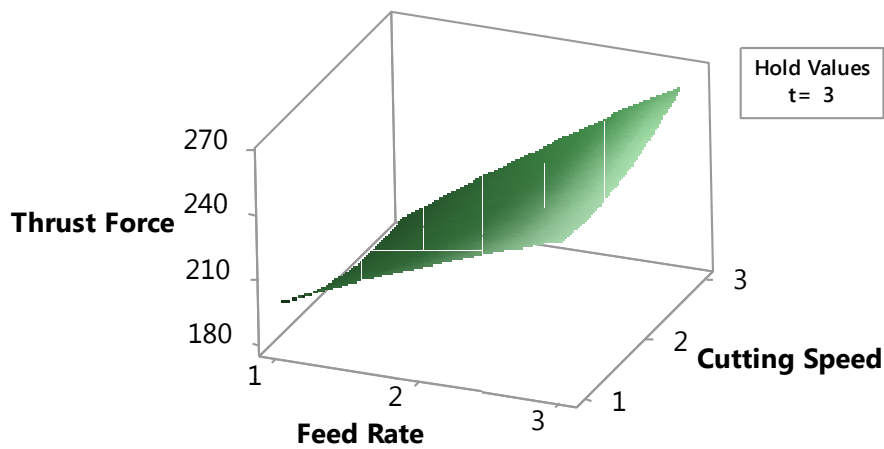
Espessura 6mm

Surface Plot of Delamination Factor vs Cutting Speed; Feed Rate



a)

Surface Plot of Thrust Force vs Cutting Speed; Feed Rate



b)

Figura 5.48 – Resposta em superfície: a) factor de delaminação para $t = 6$ mm e $d = 9$ mm; b) força axial para $t = 6$ mm e $d = 9$ mm

Comparando os gráficos das várias espessuras pode-se observar que a espessura que obtém menor factor de delaminação é a espessura de 2 mm. Pode-se observar também que para níveis de velocidade de corte médias (nível 2) e avanço baixos (nível 1) obtêm-se valores de factor de delaminação menores. Em relação à força axial verifica-se que para a menor espessura (2 mm), baixos avanços (nível 1) e velocidades de corte altas (nível 3) obtém-se menor força axial.

Tabela 5.19– Equações das regressões para broca de 9 mm do factor de delaminação e força axial.

Factor de delaminação ($\bar{R}^2=0.7772$)	$Fd = 1,216 + 0,0490 f - 0,106V - 0,1635t - 0,0014 f^2$ $+ 0,0223V^2 + 0,0686t^2 + 0,0012 f \times V - 0,0222 f \times t$
Força Axial ($\bar{R}^2=0.9801$)	$F = -59,4 + 35,1 f - 44,1V + 246,6t - 2,30 f^2 + 6,83V^2$ $- 52,93t^2 + 8,33 f \times V - 3,27 f \times t$

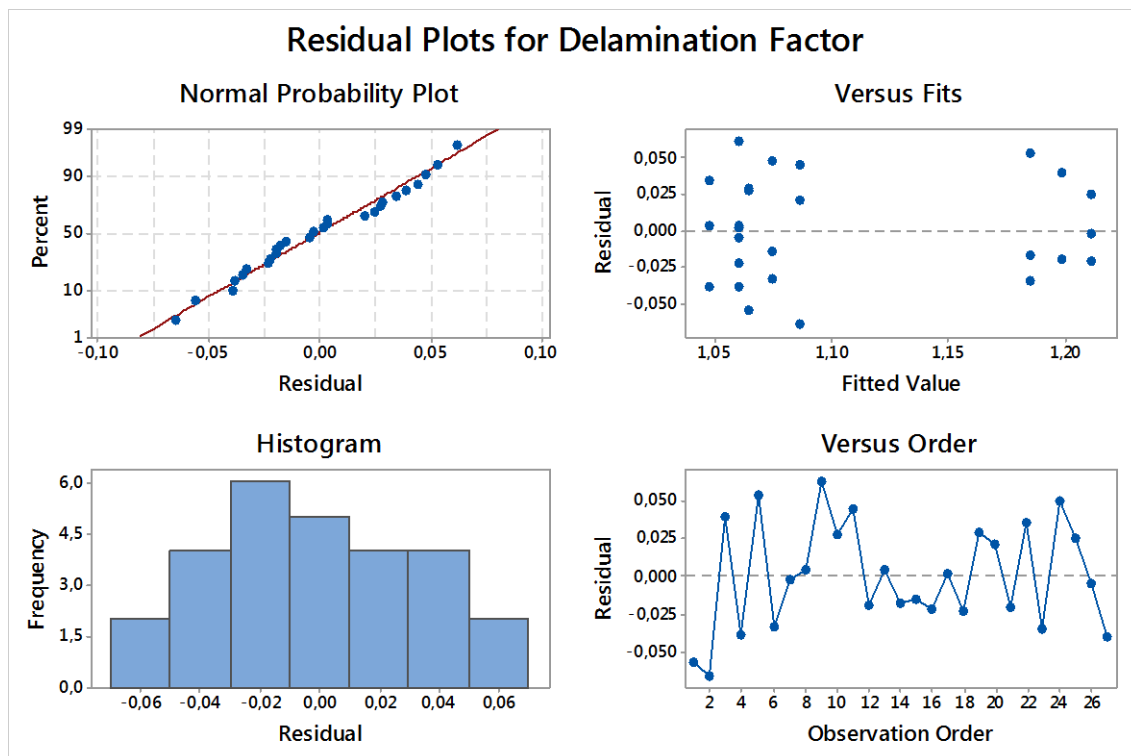


Figura 5.49 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (Broca de 9 mm).

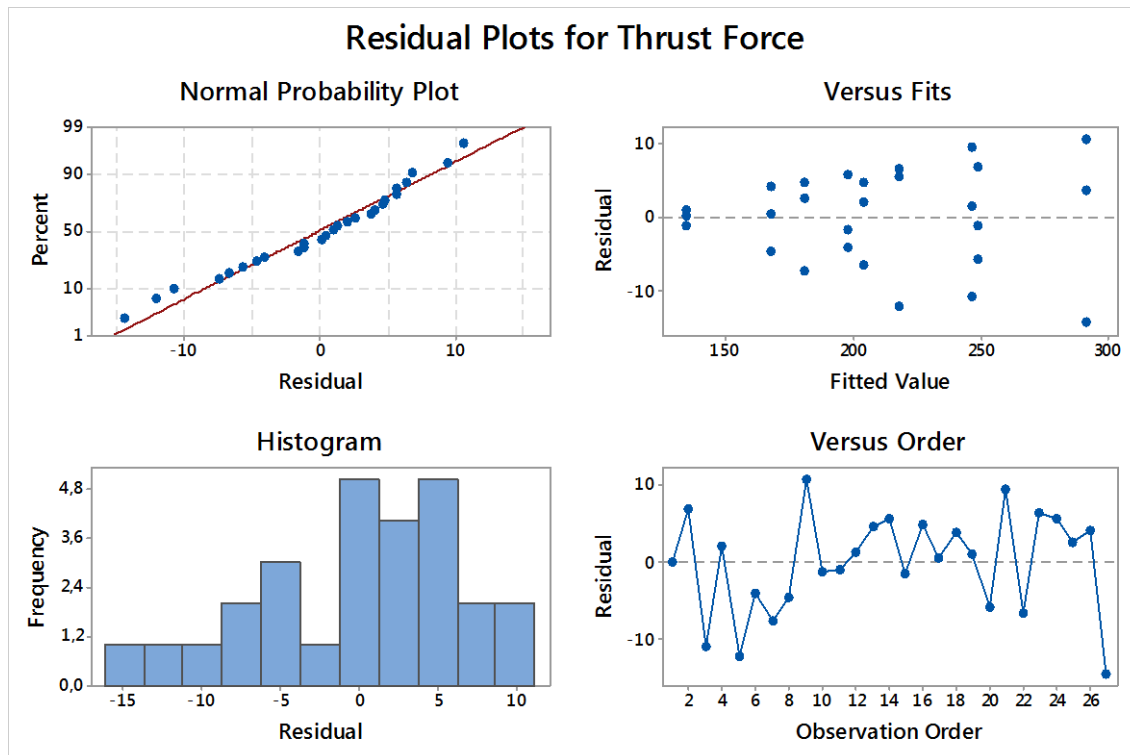


Figura 5.50 - Gráfico de resíduos para a força axial (Broca de 9 mm).

À semelhança do caso anterior pode-se observar que seguem uma tendência linear, uma distribuição normal no caso do factor de delaminação e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

Nos gráficos seguintes (Figuras 5.51 e 5.52) pode-se comparar o factor de delaminação e a força axial de todas as experiências para os diferentes níveis do factor de sinal diâmetro da broca. Verifica-se que, com o aumento do diâmetro da broca, o factor de delaminação diminui e a força axial aumenta. Em relação ao factor de sinal espessura do provete as comparações foram pouco conclusivas (Figuras 5.53 e 5.54)

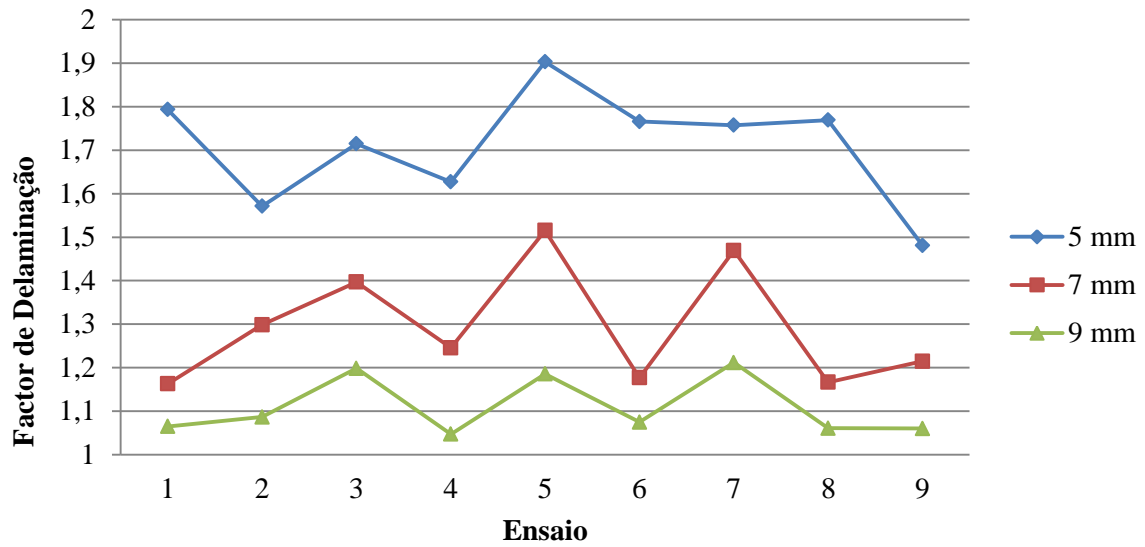


Figura 5.51 – Comparação entre os valores do factor de delaminação dos diferentes diâmetros da ferramenta

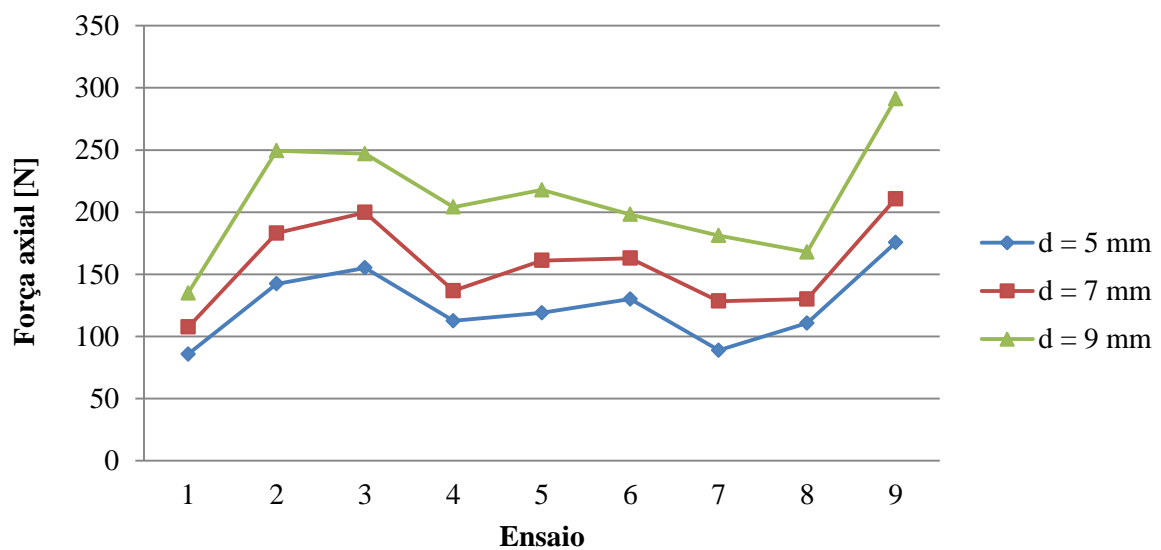


Figura 5.52 – Comparação entre os valores da força axial dos diferentes diâmetros da ferramenta

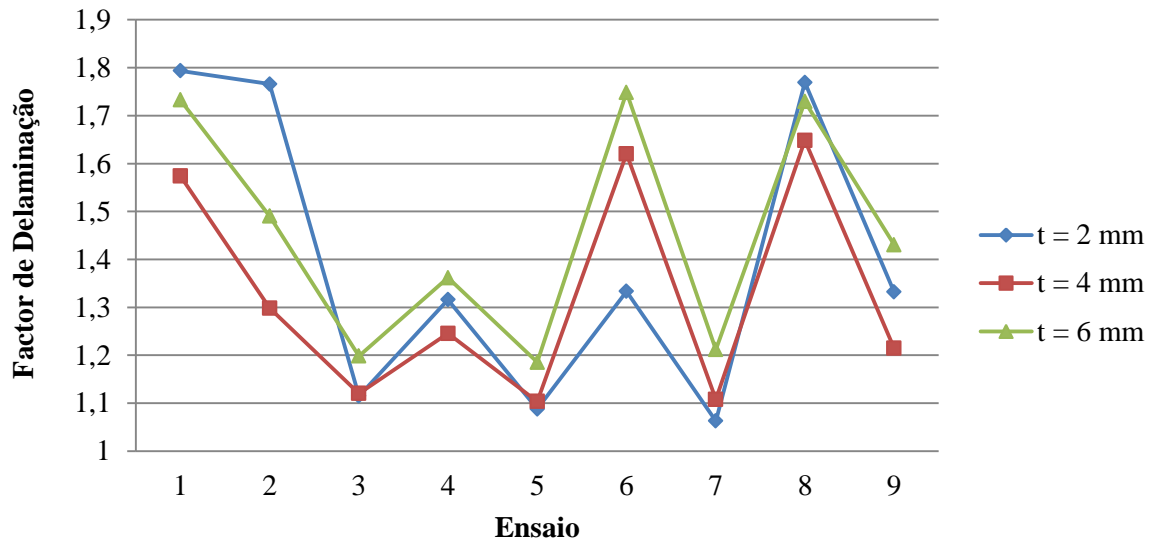


Figura 5.53 - Comparação entre os valores do factor de delaminação das diferentes espessuras de provete

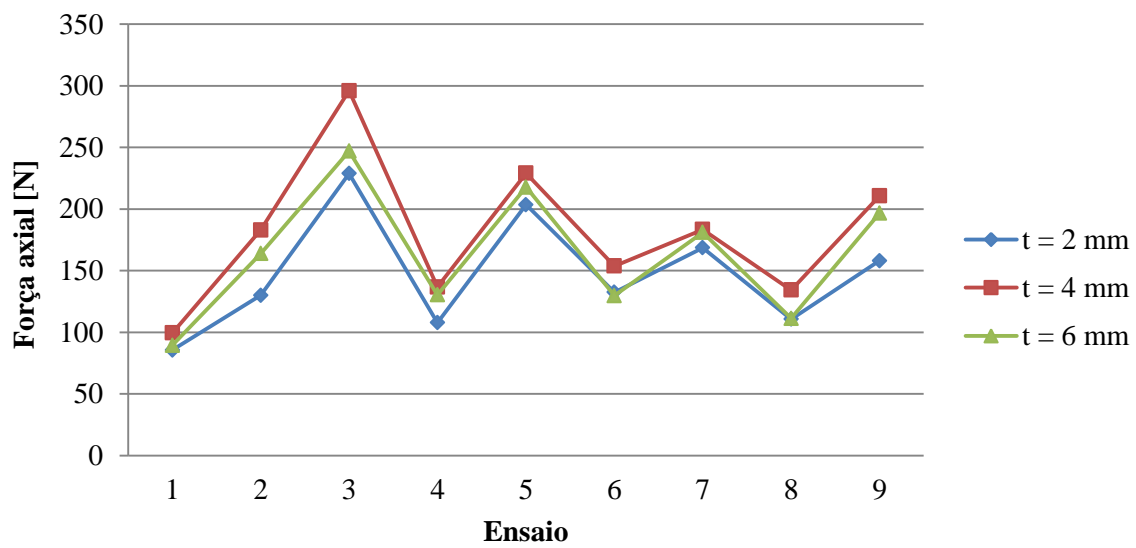


Figura 5.54 - Comparação entre os valores da força axial das diferentes espessuras de provete

Através do método de Taguchi com características dinâmicas calculou-se o Signal-to-Noise (S/N) pela forma da equação proporcional ao ponto zero para cada experiência. Os resultados de S/N obtidos na tabela 5.20 são referentes ao planeamento de experiências onde o factor de sinal é a espessura do provete. A figura 5.55 mostra graficamente estes resultados.

Tabela 5.20 – Resultados S/N para o factor de sinal espessura do provete.

	V (m/min)	F (mm/rev)	d (mm)
Level 1	-5,18697	-5,19538	-6,10499
Level 2	-5,35617	-5,1328	-5,00311
Level 3	-5,11303	-5,32798	-4,54807

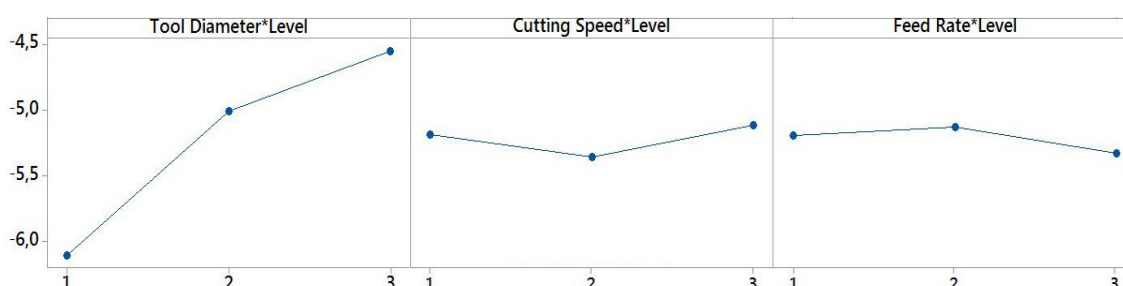


Figura 5.55 – Relação do S/N para os diferentes níveis dos factores de controlo para o factor de sinal espessura do provete.

Pelo estudo do S/N através do método de Taguchi com características dinâmicas verificamos que para o factor de sinal espessura do provete os níveis que provocam menor factor de delaminação são o nível 3 para o diâmetro da broca (9 mm), nível 3 para a velocidade de corte (300 m/min) e nível 2 para o avanço (0,15 mm/rev).

Realizou-se a regressão linear multivariável através do *Minitab* para obtenção do modelo de previsão de resposta para o factor de delaminação e a força axial. Na tabela 5.21 são apresentados os modelos empíricos obtidos para cada resposta.

Tabela 5.21- Modelos empíricos obtidos para o factor de sinal espessura

Factor de delaminação ($\bar{R}^2=0.7421$)	$Fd = 1,9932 - 0,0083V - 0,0009f - 0,2882d$
Força Axial ($\bar{R}^2=0.8645$)	$F = 7,30 - 3,96V + 31,57f + 50,60d$

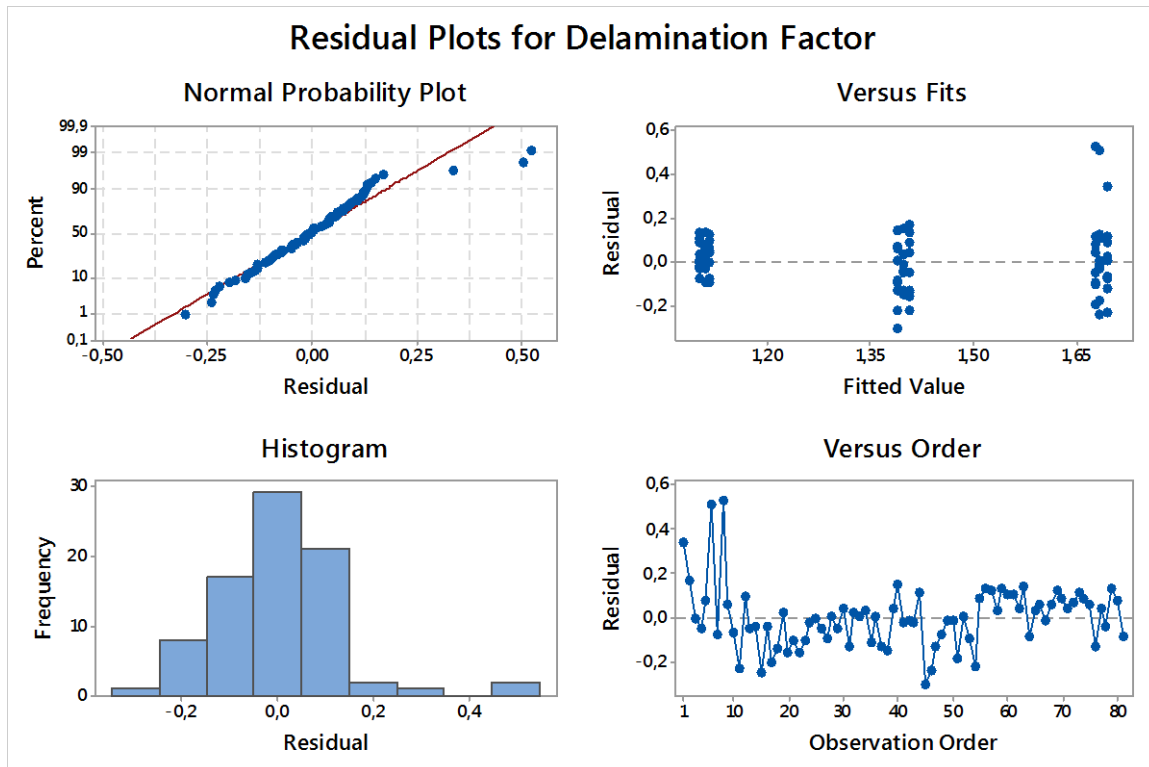


Figura 5.56 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (espessura)

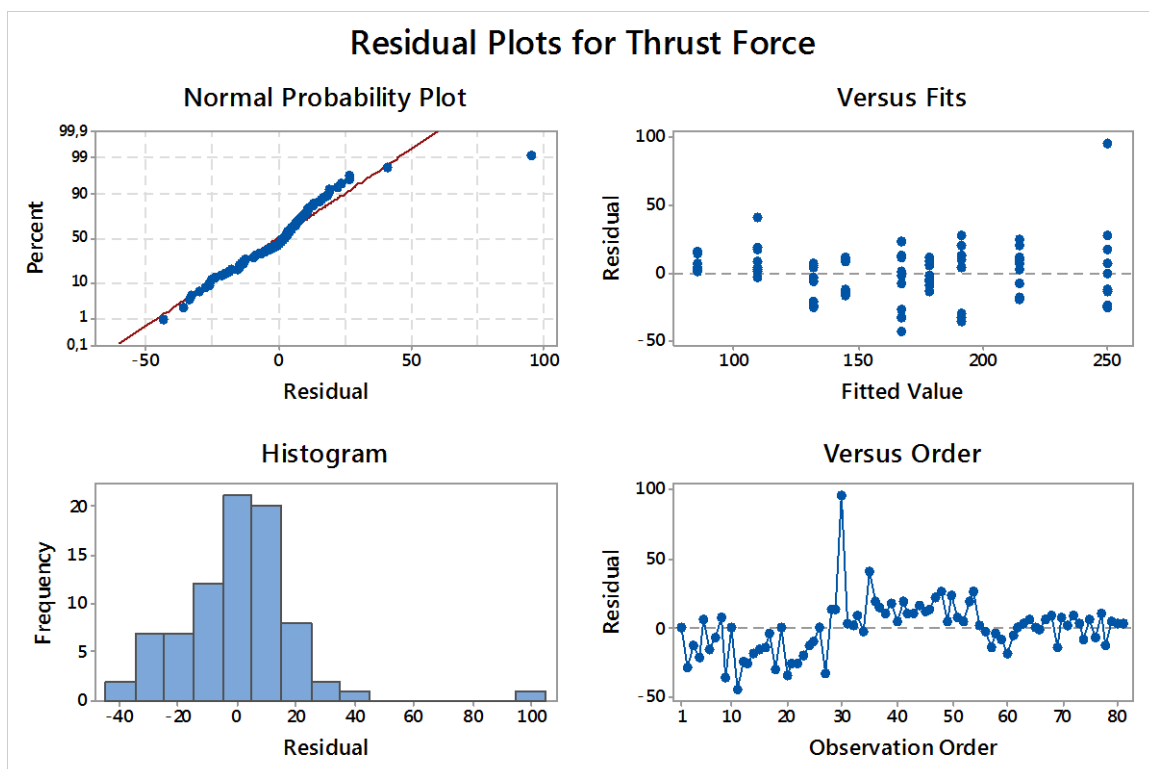


Figura 5.57 - Gráfico de resíduos para a força axial (espessura)

À semelhança do caso anterior pode-se observar que seguem uma tendência linear, uma distribuição normal e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

Os resultados de S/N obtidos na tabela 5.22 são referentes ao planeamento de experiências onde o factor de sinal é o diâmetro da broca.

Tabela 5.22 – Resultados S/N para o factor de sinal diâmetro da broca.

	V(m/min)	f (mm/rev)	t(mm)
Level 1	-10,3928	-10,7044	-11,7755
Level 2	-11,0423	-10,8103	-10,0063
Level 3	-10,4256	-10,3459	-10,0789

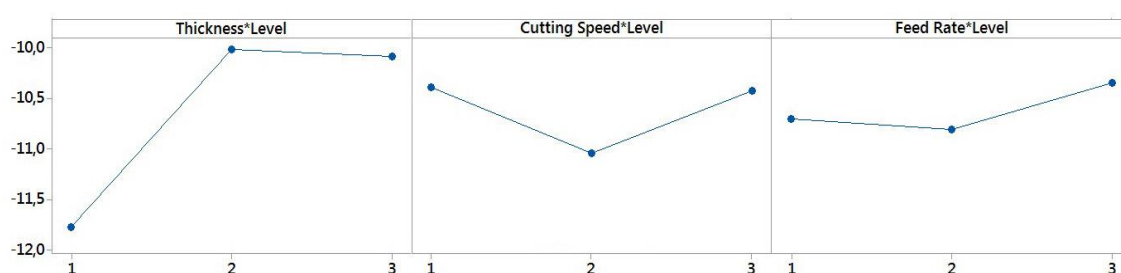


Figura 5.58 – Relação do S/N para os diferentes níveis dos factores de controlo para o factor de sinal diâmetro da broca.

Pela figura 5.58 pode observar-se que, em relação ao factor de sinal diâmetro da broca os níveis que provocam menor factor de delaminação são o nível 2 para a espessura do provete (4 mm), nível 1 para a velocidade de corte (200 m/min) e nível 3 para o avanço (0,2 mm/rev).

Tabela 5.23 – Modelos empíricos obtidos para o factor de sinal diâmetro

Factor de delaminação ($\bar{R}^2=0.0445$)	$Fd = 1,278 - 0,0012V - 0,0262f + 0,0733t$
Força Axial ($\bar{R}^2=0.8645$)	$F = 70,7 - 1,14V + 32,83f + 15,01t$

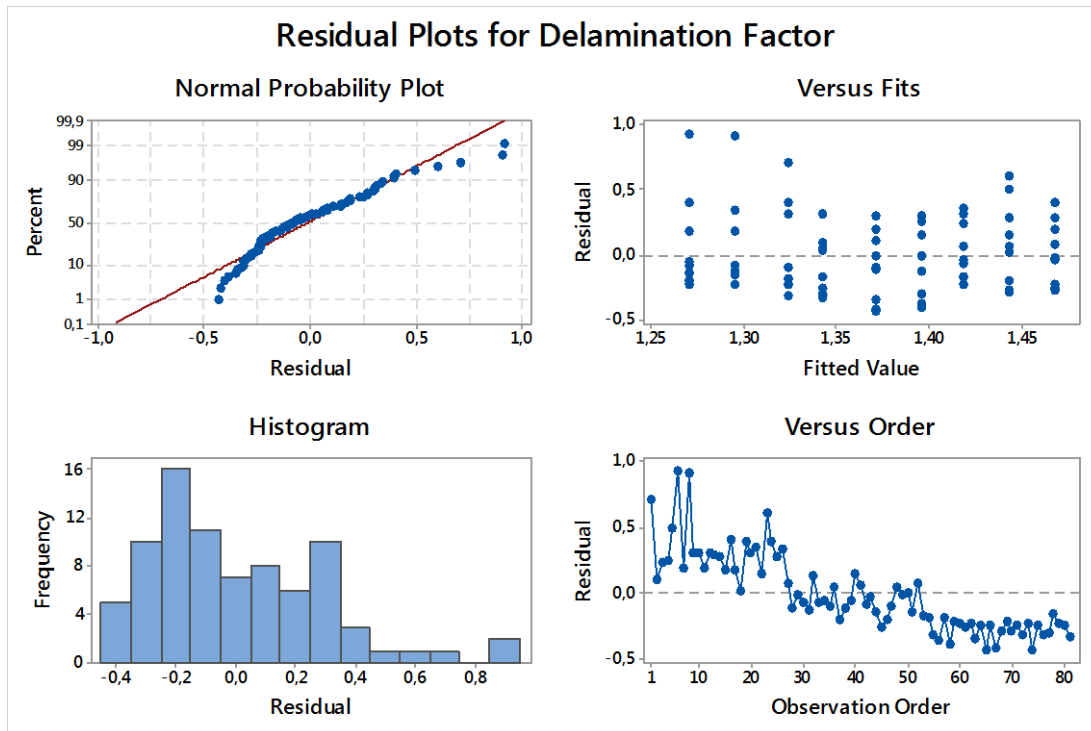


Figura 5.59 - Gráfico de resíduos para o factor de delaminação (diâmetro)

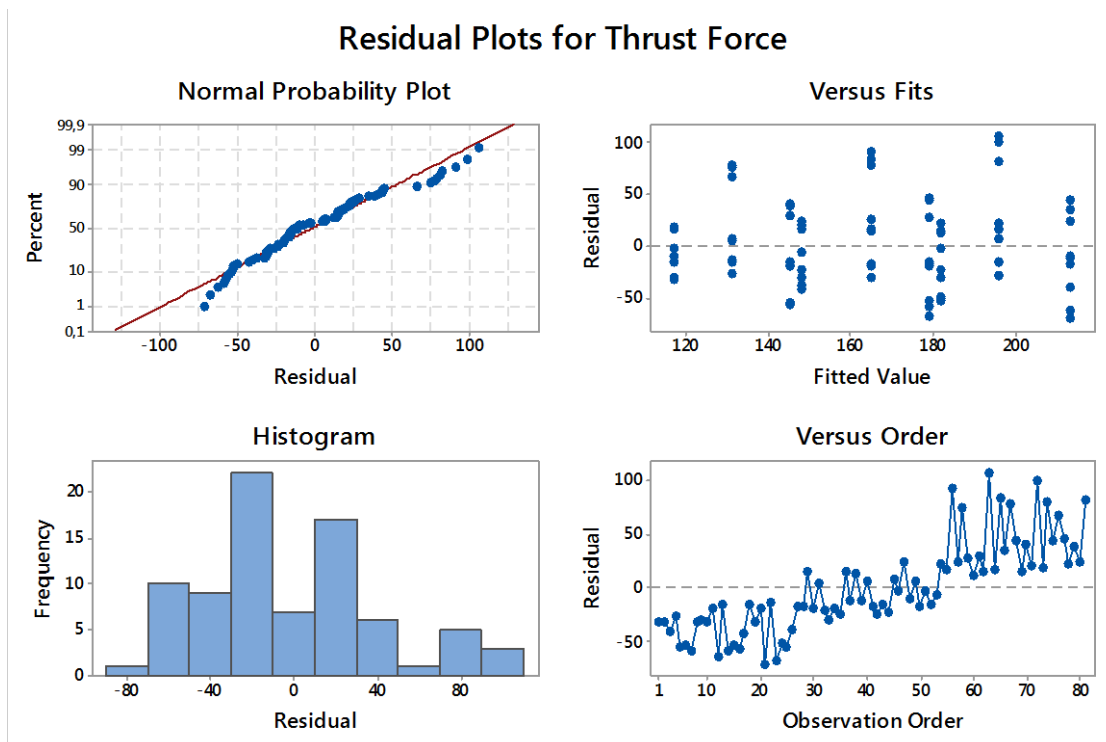


Figura 5.60 - Gráfico de resíduos para a força axial (diâmetro)

À semelhança do caso anterior pode-se observar que seguem uma tendência linear, uma distribuição normal e que existe um comportamento aleatório dos resíduos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação tínhamos como objectivo analisar a influência das variáveis do processo de furação de materiais compósitos sobre o dano através do método dinâmico de Taguchi. Como variáveis tínhamos os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, como restantes parâmetros de processo tínhamos a espessura do provete e o diâmetro da broca. Os valores dos parâmetros de corte foram estabelecidos para a condição de alta velocidade e foram usados três níveis com valores de 200, 250 e 300 m/min para a velocidade de corte e de 0,1, 0,15 e 0,2 mm/rev para o avanço. Para os factores de sinal, os três níveis correspondem a 2, 4 e 6mm para a espessura do provete e 5, 7 e 9mm para o diâmetro da broca.

Tabela 6.1 – Conjunto de valores que minimizam o factor de delaminação

	Factor de sinal espessura			Factor de sinal diâmetro		
	V	f	d	V	f	t
Nível	3	2	3	1	3	2
Valores	300 m/min	0,15 mm/ver	9 mm	200 m/min	0,2 mm/ver	4 mm

Os resultados obtidos para os factores de sinal no que diz respeito aos melhores níveis a utilizar quando se pretende minimizar o factor de delaminação são divergentes, o que pode indiciar uma forte correlação entre as variáveis seleccionadas.

Com o estudo aqui efectuado foi possível chegar a conclusões tais como:

- Quando comparado o desempenho dos diversos diâmetros de ferramenta utilizados, constata-se que os menores valores do factor de delaminação se obtêm quando utilizadas brocas de 9 mm;
- Os provetes onde se obtiveram furos com menor dano foram os de espessura de 4 mm.
- Os menores valores de força axial foram obtidos utilizando avanços e velocidades de corte mais baixos, 0,1 mm/rev e 200m/min respectivamente. No que concerne aos factores de sinal os valores mais baixos foram obtidos com os diâmetros menores (5mm) ou espessura mais reduzida (2mm).
- A resposta dinâmica do factor de delaminação relativamente á espessura indica a que a velocidade de corte óptima se encontra para níveis mais altos (300m/min). No caso do factor de sinal ser o diâmetro essa variável deverá ser mantida no valor mais baixo.
- Apesar da separação da espessura e do diâmetro da broca em factores de sinais diferentes verificamos que continua a existir uma influência tão grande destes dois parâmetros no dano que camufla a influência dos restantes parâmetros (velocidade de corte e avanço).

Devido a este facto não foi possível verificar assertivamente o avanço e a velocidade de corte que provoca menor dano.

- Não foi possível encontrar um comportamento padrão, então concluímos que não podemos generalizar o comportamento de uma espessura ou de um diâmetro de broca ou da combinação dos dois parâmetros pois cada caso é um caso específico.

O objectivo deste trabalho, a análise da influência das variáveis do processo de furacão de materiais compósitos sobre o dano através do método dinâmico de Taguchi, não foi concretizado na sua plenitude. No que diz respeito aos mecanismos do processo, não se conseguiu obter resultados globais convincentes. No entanto, a análise clássica dos resultados dos ensaios realizados apresenta consistência com as constatações encontradas na literatura. Como conclusão final, pode-se afirmar que a metodologia não é a mais adequada para a análise destes factores de entrada neste processo.

Não se conseguiu isolar os efeitos das variáveis predominantes em termos de significado estatísticos. Comprova-se que a utilização deste tipo de metodologia exige um conhecimento profundo dos mecanismos que regem o processo, sob pena dos resultados serem mal interpretados no que diz respeito aos fenómenos físicos.

Para trabalhos futuros propõem-se a análise de outras soluções metodológicas para a realização deste estudo com parâmetros de processo idênticos que possibilitem o estudo da influência das variáveis isoladamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Liu, Y. Tang, and W. L. Cong, “A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265–1279, Mar. 2012.
- [2] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. d. Magalhães, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2º Edição. Publindústria, 2005.
- [3] C. M. M. Machado, “Empirical models for quantification of machining damage in composite materials,” *Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica*, 2012.
- [4] D. N. R. da Silva, “Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP,” *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica*, 2013.
- [5] C. M. M. Tavares, “Influência da força de aperto na minimização do dano em furação a alta velocidade em materiais compósitos,” *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica*, 2013.
- [6] A. A. Griffith, “The Phenomena of Rupture and Flow in Solids,” *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, vol. 221, no. 582–593, pp. 163–198, Jan. 1921.
- [7] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. T. Marques, A. G. Magalhães, and M. Figueiredo, “Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxido com Diferentes Brocas,” 2004.
- [8] D. Liu, Y. Tang, and W. L. Cong, “A review of mechanical drilling for composite laminates,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265–1279, Mar. 2012.
- [9] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. T. Marques, A. G. Magalhães, and M. Figueiredo, “Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxido com Diferentes Brocas,” 2004. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10216/177>. [Accessed: 19-Aug-2014].
- [10] E. U. Enemuoh, A. S. El-Gizawy, and A. Chukwujekwu Okafor, “An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 12, pp. 1795–1814, Sep. 2001.
- [11] J. P. Davim and P. Reis, “Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments,” *Composite Structures*, vol. 59, no. 4, pp. 481–487, Mar. 2003.
- [12] J. P. Davim and P. Reis, “Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study,” *Materials & Design*, vol. 24, no. 5, pp. 315–324, Aug. 2003.
- [13] C. C. Tsao and H. Hocheng, “Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 10, pp. 1085–1090, Aug. 2004.
- [14] R. Q. Sardiñas, P. Reis, and J. P. Davim, “Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms,” *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 15, pp. 3083–3088, Dec. 2006.
- [15] C. C. Tsao, “Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite material,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 32, no. 9–10, pp. 877–884, Apr. 2007.
- [16] I. S. Shyha, D. K. Aspinwall, S. L. Soo, and S. Bradley, “Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 12–13, pp. 1008–1014, Oct. 2009.

- [17] J. Sedlacek and M. Slany, "ANALYSIS OF DELAMINATION IN DRILLING OF COMPOSITE MATERIALS," *MM Science Journal*, Jun-2010.
- [18] P. Curnick, "An investigation into the drilling of fibre-reinforced polymer composites using the optical microscopy inspection method," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 53, no. 5, pp. 248–252, May 2011.
- [19] S. C. Lin and I. K. Chen, "Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed," *Wear*, vol. 194, no. 1–2, pp. 156–162, Jun. 1996.
- [20] S.-C. Lin and J.-M. Shen, "Drilling Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composite Materials at High Speed," *Journal of Composite Materials*, vol. 33, no. 9, pp. 827–851, May 1999.
- [21] V. Krishnaraj, S. Vijayarangan, and G. Suresh, "An investigation on high speed drilling of glass fibre reinforced plastic (GFRP)," *Indian journal of engineering & materials sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 189–195, 2005.
- [22] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrao, and J. P. Davim, "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, no. 1–3, pp. 431–438, Jul. 2008.
- [23] J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, P. E. Faria, A. E. Correia, and J. P. Davim, "Delamination in High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)," *Journal of Composite Materials*, vol. 42, no. 15, pp. 1523–1532, Aug. 2008.
- [24] S. R. Karnik, V. N. Gaitonde, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrao, and J. P. Davim, "Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model," *Materials & Design*, vol. 29, no. 9, pp. 1768–1776, Oct. 2008.
- [25] S. Rawat and H. Attia, "Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 105–108, 2009.
- [26] S. Rawat and H. Attia, "Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites," *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1022–1030, Jun. 2009.
- [27] D. Iliescu, D. Gehin, M. E. Gutierrez, and F. Girot, "Modeling and tool wear in drilling of CFRP," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 2, pp. 204–213, Feb. 2010.
- [28] H. Hocheng and C. C. Tsao, "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 12–13, pp. 1403–1416, Oct. 2006.
- [29] M. Mehta, T.J. Reinhart, A.H. Soni, "Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates, Proc. of the Machining Composite Materials Symposium," *ASM Materials Week*, 1992.
- [30] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, Aug. 1997.
- [31] H. Hocheng and C. C. Tsao, "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, no. 1–3, pp. 335–339, Sep. 2003.

- [32] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrao, “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates,” *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, Jul. 2007.
- [33] Zulema Lopes Pereira and José Gomes Requião, *Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. Prefácio, 2008.
- [34] Madhav S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall, 1989.
- [35] G. Peace, *Taguchi Methods- A Hands On Approach To Quality Engineering*. Addison-wesley Publishing Company, 1993.
- [36] F. da S. Jorge, “Métodos de Taguchi aplicados à análise cromatográfica na identificação de isocianatos,” *Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial*, 2010.
- [37] Ross, P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 1ª edição. McGraw-Hill , Inc, Singapore, 1988.
- [38] Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., *Engineering Methods for Robust Design. Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, 1ª edição. AddisonWesley Publishing Company, 1995.
- [39] D. H. Wu, W. T. Chien, and Y. J. Tsai, “Applying Taguchi dynamic characteristics to the robust design of a piezoelectric sensor,” *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 52, no. 3, pp. 480–486, Mar. 2005.
- [40] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2012.
- [1] D. Liu, Y. Tang, and W. L. Cong, “A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265–1279, Mar. 2012.
- [2] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. d. Magalhães, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2ª Edição. Publindústria, 2005.
- [3] C. M. M. Machado, “Empirical models for quantification of machining damage in composite materials,” *Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica*, 2012.
- [4] D. N. R. da Silva, “Image processing methodology for assessment of drilling induced damage in CFRP,” *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica*, 2013.
- [5] C. M. M. Tavares, “Influência da força de aperto na minimização do dano em furação a alta velocidade em materiais compósitos,” *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica*, 2013.
- [6] A. A. Griffith, “The Phenomena of Rupture and Flow in Solids,” *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, vol. 221, no. 582–593, pp. 163–198, Jan. 1921.
- [7] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. T. Marques, A. G. Magalhães, and M. Figueiredo, “Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxido com Diferentes Brocas,” 2004.
- [8] D. Liu, Y. Tang, and W. L. Cong, “A review of mechanical drilling for composite laminates,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 4, pp. 1265–1279, Mar. 2012.
- [9] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. T. Marques, A. G. Magalhães, and M. Figueiredo, “Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxido com Diferentes Brocas,” 2004. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10216/177>. [Accessed: 19-Aug-2014].

- [10] E. U. Enemuoh, A. S. El-Gizawy, and A. Chukwujekwu Okafor, “An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 12, pp. 1795–1814, Sep. 2001.
- [11] J. P. Davim and P. Reis, “Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments,” *Composite Structures*, vol. 59, no. 4, pp. 481–487, Mar. 2003.
- [12] J. P. Davim and P. Reis, “Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study,” *Materials & Design*, vol. 24, no. 5, pp. 315–324, Aug. 2003.
- [13] C. C. Tsao and H. Hocheng, “Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 10, pp. 1085–1090, Aug. 2004.
- [14] R. Q. Sardiñas, P. Reis, and J. P. Davim, “Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms,” *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 15, pp. 3083–3088, Dec. 2006.
- [15] C. C. Tsao, “Taguchi analysis of drilling quality associated with core drill in drilling of composite material,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 32, no. 9–10, pp. 877–884, Apr. 2007.
- [16] I. S. Shyha, D. K. Aspinwall, S. L. Soo, and S. Bradley, “Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 12–13, pp. 1008–1014, Oct. 2009.
- [17] J. Sedlacek and M. Slany, “ANALYSIS OF DELAMINATION IN DRILLING OF COMPOSITE MATERIALS,” *MM Science Journal*, Jun-2010.
- [18] P. Curnick, “An investigation into the drilling of fibre-reinforced polymer composites using the optical microscopy inspection method,” *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 53, no. 5, pp. 248–252, May 2011.
- [19] S. C. Lin and I. K. Chen, “Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed,” *Wear*, vol. 194, no. 1–2, pp. 156–162, Jun. 1996.
- [20] S.-C. Lin and J.-M. Shen, “Drilling Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composite Materials at High Speed,” *Journal of Composite Materials*, vol. 33, no. 9, pp. 827–851, May 1999.
- [21] V. Krishnaraj, S. Vijayarangan, and G. Suresh, “An investigation on high speed drilling of glass fibre reinforced plastic (GFRP),” *Indian journal of engineering & materials sciences*, vol. 12, no. 3, pp. 189–195, 2005.
- [22] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrao, and J. P. Davim, “Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, no. 1–3, pp. 431–438, Jul. 2008.
- [23] J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, P. E. Faria, A. E. Correia, and J. P. Davim, “Delamination in High Speed Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP),” *Journal of Composite Materials*, vol. 42, no. 15, pp. 1523–1532, Aug. 2008.
- [24] S. R. Karnik, V. N. Gaitonde, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrao, and J. P. Davim, “Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model,” *Materials & Design*, vol. 29, no. 9, pp. 1768–1776, Oct. 2008.
- [25] S. Rawat and H. Attia, “Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 105–108, 2009.

- [26] S. Rawat and H. Attia, "Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites," *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1022–1030, Jun. 2009.
- [27] D. Iliescu, D. Gehin, M. E. Gutierrez, and F. Girot, "Modeling and tool wear in drilling of CFRP," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 2, pp. 204–213, Feb. 2010.
- [28] H. Hocheng and C. C. Tsao, "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 12–13, pp. 1403–1416, Oct. 2006.
- [29] M. Mehta, T.J. Reinhart, A.H. Soni, "Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates, Proc. of the Machining Composite Materials Symposium," *ASM Materials Week*, 1992.
- [30] W.-C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, Aug. 1997.
- [31] H. Hocheng and C. C. Tsao, "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, no. 1–3, pp. 335–339, Sep. 2003.
- [32] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, Jul. 2007.
- [33] Zulema Lopes Pereira and José Gomes Requião, *Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. Prefácio, 2008.
- [34] Madhav S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall, 1989.
- [35] G. Peace, *Taguchi Methods- A Hands On Approach To Quality Engineering*. Addison-wesley Publishing Company, 1993.
- [36] F. da S. Jorge, "Métodos de Taguchi aplicados à análise cromatográfica na identificação de isocianatos," *Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial*, 2010.
- [37] Ross, P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 1ª edição. McGraw-Hill , Inc, Singapore, 1988.
- [38] Fowlkes, W. Y. and Creveling, C. M., *Engineering Methods for Robust Design. Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, 1ª edição. AddisonWesley Publishing Company, 1995.
- [39] D. H. Wu, W. T. Chien, and Y. J. Tsai, "Applying Taguchi dynamic characteristics to the robust design of a piezoelectric sensor," *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 52, no. 3, pp. 480–486, Mar. 2005.
- [40] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2012.

Referências Bibliográficas

ANEXOS

Resultados para todos os ensaios realizados.

1º Replicação

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	85,9636	2,035246
2	250	3184	15920	0,20	3184	5	129,5392	2,190536
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	237,1557	1,11318
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	110,4575	1,35312
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	220,9956	1,182803
6	200	1819	9095	0,15	1364	7	139,5352	1,576887
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	172,2379	1,027
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	116,6999	2,202709
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	155,2019	1,451145

Tabela 0.1 – Ensaios 1º réplica (variável – d; espessura 2mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	98,8998	1,69698
2	200	1819	9095	0,15	1364	7	180,4526	1,358331
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	345,1749	1,162703
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	135,8752	1,268075
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	215,8761	1,131132
6	250	3184	15920	0,20	3184	5	153,3573	1,690256
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	176,7784	1,132362
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	149,9662	1,567655
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	210,8351	1,393918

Tabela 0.2 – Ensaios 1º réplica (variável – d; espessura 4mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	87,9426	1,779317
2	200	1819	9095	0,15	1364	7	164,7931	1,536386
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	236,1429	1,237836
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	127,9646	1,429107
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	205,7426	1,238501
6	250	3184	15920	0,20	3184	5	127,0663	1,790356
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	173,6276	1,20918
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	109,8146	1,7201
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	194,82	1,53154

Tabela 0.3 – Ensaios 1º réplica (variável – d; espessura 6mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	2	85,9636	2,035246
2	200	2546,4	12732	0,15	1910	4	134,6605	1,481492
3	200	2546,4	12732	0,20	2546	6	173,058	1,64901
4	250	3184	15920	0,10	1592	4	104,6783	1,647736
5	250	3184	15920	0,15	2388	6	125,0204	1,942258
6	250	3184	15920	0,20	3184	2	129,5392	2,190536
7	300	3820	19100	0,10	1910	6	87,1545	1,660353
8	300	3820	19100	0,15	2865	2	116,6999	2,202709
9	300	3820	19100	0,20	3820	4	166,7032	1,647642

Tabela 0.4 – Ensaios 1º réplica (variável – t; diâmetro 5mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	1819	9095	0,10	910	2	100,8807	1,220604
2	200	1819	9095	0,15	1364	4	180,4526	1,358331
3	200	1819	9095	0,20	1819	6	194,7901	1,349728
4	250	2274	11370	0,10	1137	4	135,8752	1,268075
5	250	2274	11370	0,15	1710	6	159,1679	1,585007
6	250	2274	11370	0,20	2274	2	151,8522	1,208503
7	300	2730	13650	0,10	1365	6	125,3453	1,419753
8	300	2730	13650	0,15	2047	2	123,6157	1,204183
9	300	2730	13650	0,20	2730	4	210,8351	1,393918

Tabela 0.5 – Ensaios 1º réplica (variável – t; diâmetro 7mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	1414,8	7074	0,10	707	2	134,9381	1,008815
2	200	1414,8	7074	0,15	1061	4	256,284	1,021162
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	6	236,1429	1,237836
4	250	1770	8850	0,10	885	4	206,0593	1,008712
5	250	1770	8850	0,15	1328	6	205,7426	1,238501
6	250	1770	8850	0,20	1770	2	194,131	1,041477
7	300	2122	10610	0,10	1061	6	173,6276	1,20918
8	300	2122	10610	0,15	1592	2	163,2176	1,064059
9	300	2122	10610	0,20	2122	4	301,9434	1,122056

Tabela 0.6 – Ensaios 1º réplica (variável – t; diâmetro 9mm)

2º Replica

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	85,6559	1,628464
2	250	3184	15920	0,20	3184	5	128,8827	1,443353
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	225,8461	1,212909
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	106,7979	1,350432
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	195,6594	1,073351
6	200	1819	9095	0,15	1364	7	124,217	1,175696
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	164,12	1,066218
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	105,4643	1,477571
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	161,2313	1,252979

Tabela 0.7 – Ensaios 2º réplica (variável – d; espessura 2mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	100,5585	1,566067
2	200	1819	9095	0,15	1364	7	178,7335	1,260455
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	266,7786	1,156162
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	137,1235	1,084203
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	233,2439	1,086462
6	250	3184	15920	0,20	3184	5	155,5104	1,669209
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	189,5993	1,08244
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	125,1875	1,794012
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	202,9959	1,084203

Tabela 0.8 – Ensaios 2º réplica (variável – d; espessura 4mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	91,9512	1,61354
2	200	1819	9095	0,15	1364	7	168,3125	1,441783
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	248,3893	1,179071
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	138,7366	1,388019
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	223,5033	1,167525
6	250	3184	15920	0,20	3184	5	130,7911	1,807987
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	185,9396	1,189756
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	111,5806	1,717428
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	200,8291	1,459566

Tabela 0.9 – Ensaios 2º réplica (variável – d; espessura 6mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	2	85,6559	1,628464
2	200	2546,4	12732	0,15	1910	4	146,5082	1,560537
3	200	2546,4	12732	0,20	2546	6	150,1208	1,731577
4	250	3184	15920	0,10	1592	4	115,4694	1,69291
5	250	3184	15920	0,15	2388	6	120,303	1,718195
6	250	3184	15920	0,20	3184	2	128,8827	1,443353
7	300	3820	19100	0,10	1910	6	89,28	1,869937
8	300	3820	19100	0,15	2865	2	105,4643	1,477571
9	300	3820	19100	0,20	3820	4	180,2176	1,368957

Tabela 0.10 – Ensaios 2º réplica (variável – t; diâmetro 5mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	1819	9095	0,10	910	2	106,3745	1,131751
2	200	1819	9095	0,15	1364	4	178,7335	1,260455
3	200	1819	9095	0,20	1819	6	201,2022	1,369074
4	250	2274	11370	0,10	1137	4	137,1235	1,084203
5	250	2274	11370	0,15	1710	6	162,5573	1,506979
6	250	2274	11370	0,20	2274	2	158,332	1,188986
7	300	2730	13650	0,10	1365	6	129,6121	1,440241
8	300	2730	13650	0,15	2047	2	125,4149	1,161851
9	300	2730	13650	0,20	2730	4	202,9959	1,084203

Tabela 0.11 – Ensaios 2º réplica (variável – t; diâmetro 7mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	1414,8	7074	0,10	707	2	133,6827	1,092244
2	200	1414,8	7074	0,15	1061	4	248,3121	1,131122
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	6	248,3893	1,179071
4	250	1770	8850	0,10	885	4	208,7302	1,050998
5	250	1770	8850	0,15	1328	6	223,5033	1,167525
6	250	1770	8850	0,20	1770	2	196,5785	1,059624
7	300	2122	10610	0,10	1061	6	185,9396	1,189756
8	300	2122	10610	0,15	1592	2	168,3411	1,061937
9	300	2122	10610	0,20	2122	4	294,9661	1,037228

Tabela 0.12 – Ensaios 2º réplica (variável – t; diâmetro 9mm)

3º Replica

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	85,3375	1,717243
2	250	3184	15920	0,20	3184	5	131,7035	1,663811
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	223,6519	1,019051
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	106,2381	1,24426
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	193,9443	1,00787
6	200	1819	9095	0,15	1364	7	133,8042	1,247639
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	169,3628	1,09599
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	109,7989	1,627309
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	158,0449	1,292024

Tabela 0.13 – Ensaios 3º réplica (variável – d; espessura 2mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	98,9554	1,459127
2	200	1819	9095	0,15	1364	7	190,0181	1,27643
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	276,2761	1,041737
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	137,2039	1,384522
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	238,1447	1,093741
6	250	3184	15920	0,20	3184	5	152,6386	1,501277
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	183,9145	1,109606
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	127,8996	1,583481
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	218,1297	1,165448

Tabela 0.14 – Ensaios 3º réplica (variável – d; espessura 4mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	d (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	5	88,8168	1,805713
2	200	1819	9095	0,15	1364	7	158,8293	1,492707
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	9	256,4838	1,178797
4	250	2274	11370	0,10	1137	7	124,7505	1,26776
5	250	1770	8850	0,15	1327	9	224,3155	1,150505
6	250	3184	15920	0,20	3184	5	131,5705	1,647126
7	300	2122	10610	0,10	1061	9	183,7518	1,23655
8	300	3820	19100	0,15	2865	5	112,6561	1,750972
9	300	2730	13650	0,20	2730	7	194,2946	1,300279

Tabela 0.15 – Ensaios 3º réplica (variável – d; espessura 6mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	2546,4	12732	0,10	1273	2	85,3375	1,717243
2	200	2546,4	12732	0,15	1910	4	145,649	1,672305
3	200	2546,4	12732	0,20	2546	6	142,2605	1,764488
4	250	3184	15920	0,10	1592	4	117,1063	1,540709
5	250	3184	15920	0,15	2388	6	111,2818	2,050014
6	250	3184	15920	0,20	3184	2	131,7035	1,663811
7	300	3820	19100	0,10	1910	6	89,8945	1,742112
8	300	3820	19100	0,15	2865	2	109,7989	1,627309
9	300	3820	19100	0,20	3820	4	179,4966	1,426347

Tabela 0.16 – Ensaios 3º réplica (variável – t; diâmetro 5mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	1819	9095	0,10	910	2	115,0071	1,135488
2	200	1819	9095	0,15	1364	4	190,0181	1,27643
3	200	1819	9095	0,20	1819	6	202,9652	1,471357
4	250	2274	11370	0,10	1137	4	137,2039	1,384522
5	250	2274	11370	0,15	1710	6	161,2989	1,454424
6	250	2274	11370	0,20	2274	2	178,5082	1,132284
7	300	2730	13650	0,10	1365	6	129,9928	1,54779
8	300	2730	13650	0,15	2047	2	140,8996	1,133161
9	300	2730	13650	0,20	2730	4	218,1297	1,165448

Tabela 0.17 – Ensaios 3º réplica (variável – t; diâmetro 7mm)

Exp	v (m/min)	S (rev/min)	Sreal (rev/min)	f (mm/rev)	F (mm/min)	t (mm)	F	FD
1	200	1414,8	7074	0,10	707	2	135,9019	1,092902
2	200	1414,8	7074	0,15	1061	4	243,6631	1,107383
3	200	1414,8	7074	0,20	1415	6	256,4838	1,178797
4	250	1770	8850	0,10	885	4	197,4301	1,082208
5	250	1770	8850	0,15	1328	6	224,3155	1,150505
6	250	1770	8850	0,20	1770	2	203,8734	1,123286
7	300	2122	10610	0,10	1061	6	183,7518	1,23655
8	300	2122	10610	0,15	1592	2	171,9547	1,055789
9	300	2122	10610	0,20	2122	4	276,7601	1,020873

Tabela 0.18 – Ensaios 3º réplica (variável – t; diâmetro 9mm)